

Desenvolvimento de um sistema de rádio localização na banda dos 433 MHz para ambientes exteriores

Relatório de Projecto apresentado para a obtenção do grau de Mestre
em Automação e Comunicações em Sistemas de Energia

Autor
Bernardino Pinto Neves

Orientador
Doutor Victor Daniel Neto dos Santos
Professor Adjunto ISEC

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que me apoiaram e contribuíram para a conclusão deste Mestrado, e em particular:

Ao professor Victor Daniel Neto Santos pela orientação, acompanhamento, incentivo e permanente disponibilidade demonstrada durante este projecto;

Aos diversos professores das unidades da componente curricular do Mestrado em Automação e Comunicações em Sistemas de Energia (MACSE) pelo apoio dado durante as aulas;

À minha família, em particular à minha mulher e filhos, pelo estímulo e natural apoio demonstrado ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, pelo apoio e contribuições que deram durante o desenvolvimento do presente projecto.

À empresa onde trabalho *ENEIDA Wireless & Sensors SA*, pelo incentivo e apoio dado durante a frequência do mestrado.

Por último, mas não menos importantes, a todos os que directa e indirectamente deram o seu apoio e contribuição.

O meu muito obrigado a todos.

RESUMO

O presente trabalho, pretende analisar, estudar e implementar um sistema localização *outdoor*, recorrendo a técnicas de rádio localização.

É objectivo deste trabalho, implementar um sistema de rádio localização *outdoor*, capaz de determinar a posição de um alvo dentro de uma área aproximadamente de 2 hectares, com uma precisão aceitável. Durante este trabalho foram realizados diversos estudos de sistemas de rádio localização possíveis e existentes de modo a ser possível implementar um sistema de rádio localização capaz de responder as necessidades pretendidas.

Após uma análise inicial das várias técnicas de rádio localização existentes, chegou-se a conclusão que para o projecto em questão as melhores técnicas seriam, as técnicas baseadas na força do sinal recebido RSSI e o tempo de propagação do sinal no espaço. Nesta análise inicial também foram abordados aspectos relacionados com os sistemas de comunicação via rádio e eficiência energética.

Palavras-chave: Sistemas de rádio localização; Rádio frequência; Localização *Outdoor*.

ABSTRACT

The present works want to analyze, study and implement a system location outdoors, using techniques of radio location.

It's aim of this work, implement a radio outdoor location system, capable of determining the position of a target within an area of about 2 acres with acceptable accuracy. During this work were performed several studies of radio location systems possibles and existing, in order to be possible to implement a radio location system capable of meeting the intended needs.

After an initial analysis of the various radio location techniques existing, we reached the conclusion that for the project in question would be the best techniques, are the techniques based on Received Signal Strength Indication RSSI and the signal propagation time in space. In this initial analysis were also discussed aspects related to radio communication systems and energy efficiency.

Keywords: Systems of radio location; Radio frequency; Outdoor Location.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ABREVIATURAS.....	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objectivos e Metodologia.....	2
1.1.1 Objectivos do projecto	2
1.2 Estrutura do relatório do projecto	3
2 Propagação de sinais rádio.....	5
2.1 Ondas de rádio.	5
2.2 Antenas.....	7
2.2.1 Antena dipolo de meio comprimento de onda.	8
2.2.2 Antena monopolo de um quarto comprimento de onda.....	10
2.2.3 Ganho e directividade.	11
2.2.3.1 Antena Cardioide.....	16
2.3 Modelos de propagação de sinais rádio.	17
2.3.1 Modelos de propagação	19
2.3.2 Propagação de ondas de rádio – Modelo de 2 raios.	19
2.3.3 Modelos de desvanecimento.....	22
2.4 Conclusão	24
3 Técnicas de rádio localização.....	25
3.1 Sistemas de localização baseados na distância	25
3.1.1 Radio Signal Strenght Indicator - RSSI	25
3.1.2 Time of Arrival (TOA)	28
3.1.3 Time Difference of Arrival (TDOA).....	29
3.1.4 Angle of Arrival (AOA).....	31
3.1.5 RF Fingerprinting	32
3.2 Sistemas de localização baseados na conexão	33
3.3 Filtragem.....	33
3.3.1 Método de estimação de Monte Carlo.....	33
3.3.2 Filtro de partículas	37
3.4 Conclusão	47
4 Sistema de rádio localização proposto.....	49
4.1 Introdução.....	49
4.1.1 Topologias e protocolos de rádio localização.....	50
4.2 Plataforma de hardware desenvolvida.....	52
4.2.1 Hardware.....	54
4.2.2 Protocolo de comunicação.....	57
4.2.3 Firmware.	60
4.2.3.1 Estrutura comum do firmware.	61
4.2.3.2 Dispositivo móvel.	67
4.2.3.3 Dispositivo estação base repetidor.....	68
4.2.3.4 Dispositivo estação base.	70
4.3 <i>Software</i> de monitorização do sistema.	71

4.4	Conclusão	73
5	Resultados experimentais e simulações	75
5.1	Verificação e validação do <i>hardware</i> proposto.	75
5.2	Validação do modelo do sistema proposto.	80
5.3	Verificação e validação do <i>software</i> do sistema proposto.	90
5.4	Conclusão	92
6	Conclusões	93
6.1	Principais Conclusões	93
6.2	Trabalhos futuros	94
7	Referências.....	95
8	ANEXO I.....	101
8.1	Estrutura comum do firmware	101
8.2	Configuração, inicialização, funcionamento do MRF49XA.	104
8.3	Firmware – Dispositivo móvel.	107
8.4	Firmware – Estação base repetidor.	108
8.5	Firmware – Estação base.....	110
9	ANEXO II.....	113
9.1	<i>Software</i> de monitorização do sistema	113
10	ANEXO III	115
10.1	Algoritmo de localização por lateração circular em MATLAB	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama de blocos de um sistema transmissor/receptor rádio [2].	5
Figura 2.2 – Propagação de uma onda de rádio, campos H e E radiados por uma antena vertical [2].	5
Figura 2.3 – Classificação da onda de rádio em função da polarização [2].	6
Figura 2.4 – Transmissão de uma onda de rádio.	7
Figura 2.5 – Antena dipolo de meia onda.	8
Figura 2.6 – Distribuição da corrente RF e potencial eléctrico E, na antena dipolo.	8
Figura 2.7 – Campo magnético e eléctrico, gerados pela antena dipolo.	9
Figura 2.8 – Diagrama de radiação vertical [2].	9
Figura 2.9 – Diagrama de radiação horizontal.	9
Figura 2.10 – Diagrama de radiação em três dimensões, antena dipolo de meia onda.	10
Figura 2.11 – Diagrama de radiação vertical, antena monopolo de $\frac{1}{4} \lambda$.	10
Figura 2.12 – Colocação de radiais de modo a criar uma terra artificial.	11
Figura 2.13 – Direcção de irradiação de uma antena para uma direcção.	11
Figura 2.14 – Diagrama de radiação de uma antena isotrópica.	11
Figura 2.15 – Lóbulo principal de radiação de uma antena [2].	12
Figura 2.16 – Antena dipolo com reflector [38].	14
Figura 2.17 – Antena dipolo com reflector e director [38].	14
Figura 2.18 – Antena dipolo com reflector plano [2].	15
Figura 2.19 – Antena dipolo com reflector de canto [2].	15
Figura 2.20 – Antena dipolo com reflector de curva.	15
Figura 4.21 – Diagrama de radiação em forma de cardioide.	16
Figura 2.22 – Antena cardioide S.CDA de 2 elementos e diagrama de radiação H e V.	16
Figura 2.23 – Antena cardioide S.MA de 4 elementos e diagrama de radiação H e V.	17
Figura 2.24 – Contribuição das diversas atenuações, na propagação da onda de rádio.	18
Figura 2.25 – Modelo de propagação de dois raios.	20
Figura 2.26 – Relação entre distância e potência recebida, modelo 2 raios.	21
Figura 2.27 – <i>Setup</i> experimental.	21
Figura 2.28 – Resultados obtidos experimentalmente por uma das estações base.	21
Figura 2.29 – Desvanecimento de <i>Rice</i> para $k = 0, 10$ e 20 .	23
Figura 3.1 – Gráficos da distância em função do valor do RSSI, sem e com ruído.	25
Figura 3.2 – Determinação da posição por lateração.	26
Figura 3.3 – Determinação da posição através do modelo A.	29
Figura 3.4 – Determinação da posição através do modelo B.	30
Figura 3.5 – Determinação da posição através do ângulo de chegada.	31
Figura 3.6 – Mapa de <i>Fingerprinting</i> .	32
Figura 3.7 – Exemplo de um sistema de localização baseado na detecção directa.	33
Figura 3.8 – Gráficos das funções densidade e distribuição de probabilidade.	34
Figura 3.9 – Conjunto de amostras obtidas para a uma distância de 150 metros.	35
Figura 3.10 – Gráfico da função densidade de probabilidade.	36
Figura 3.11 – Gráfico da função distribuição de probabilidade.	36
Figura 3.12 – Resultado da filtragem usando o método Monte Carlo .	37
Figura 3.13 – Trajectória representada por uma nuvem de partículas.	38
Figura 3.14 – Conjunto de amostras obtidas para a uma distância de 150 metros.	40

Figura 3.15 – Representação gráfica da nuvem de partículas a) e resultado da filtragem b).	41
Figura 3.16 – Representação gráfica da nuvem de partículas associada as amostra obtidas.	42
Figura 3.17 – Resultado da filtragem para o conjunto das amostras obtidas.	42
Figura 3.18 – Fluxograma do algoritmo implementado.	43
Figura 3.19 – Gráfico da função que melhor se aproxima a representação das amostras.	44
Figura 3.20 – Representação gráfica da função do modelo do sistema.	44
Figura 3.21 – Representação gráfica da nuvem de partículas associada a cada amostra.	45
Figura 3.22 – Resultado final da filtragem pelo método filtro de partículas.	45
Figura 3.23 – Gráfico da relação entre distância real e estimada.	46
Figura 3.24 – Histograma da distribuição do erro.	46
Figura 4.1 – <i>Layout</i> do sistema rádio localização a implementar.	49
Figura 4.2 – Elementos do sistema rádio localização a implementar.	50
Figura 4.3 – Sistema baseado no protocolo <i>Master/Slave</i> .	51
Figura 4.4 – Sistema baseado no método dos faróis.	51
Figura 4.5 – Sistema baseado no método “ <i>Wake Up</i> ”.	52
Figura 4.6 – <i>Pinout</i> do microcontrolador PIC18F26K22 [82].	53
Figura 4.7 – <i>Pinout</i> do <i>transceiver</i> rádio MRF49XA [83].	53
Figura 4.8 – Relação entre o valor de RSSI e a tensão da saída analógica [83].	54
Figura 4.9 – Circuito elétrico recomendado pelo fabricante [83].	55
Figura 4.10 – Diagrama de blocos do dispositivo rádio.	56
Figura 4.11 – Circuito elétrico do microcontrolador.	56
Figura 4.12 – Circuito elétrico do <i>transceiver</i> rádio.	56
Figura 4.13 – Placa de circuito impresso do dispositivo rádio.	57
Figura 4.14 – Dispositivo rádio, aspecto final.	57
Figura 4.15 – Protocolo de comunicações entre um dispositivo móvel e a estação base.	58
Figura 4.16 – Exemplo do protocolo de comunicações entre um dispositivo móvel e a estação base.	58
Figura 4.17 – Ocupação do canal rádio durante um processo de localização.	59
Figura 4.18 – Protocolo de comunicações entre estações base.	59
Figura 4.19 – Exemplo do protocolo de comunicações entre duas estações base.	59
Figura 4.20 – Exemplo do conteúdo de várias mensagens enviadas para a unidade central de gestão e processamento de dados.	60
Figura 4.21 – Diagrama de blocos do circuito oscilador do microcontrolador [10].	61
Figura 4.22 – Fluxograma da inicialização e configurações dos periféricos.	61
Figura 4.23 – Diagrama de blocos do temporizador <i>TMRO</i> configurado a 16 bits [10].	62
Figura 4.24 – Diagrama de blocos do temporizador <i>TMRI</i> configurado a 16 bits [10].	62
Figura 4.25 – Diagrama de blocos genérico dos portos <i>IO</i> [10].	63
Figura 4.26 – Diagrama de blocos do conversor <i>ADC</i> [10].	63
Figura 4.27 – Diagramas de blocos do transmissor e receptor <i>UART</i> [10].	64
Figura 4.28 – Diagrama de blocos do periférico <i>SPI</i> [10].	65
Figura 4.29 – Diagrama lógico das interrupções [10].	65
Figura 4.30 – Diagrama de blocos funcional do <i>transceiver</i> rádio MRF49XA [11].	66
Figura 4.31 – Fluxograma do programa implementado para os dispositivos móveis.	68
Figura 4.32 – Fluxograma do programa implementado para as estações base repetidoras.	69
Figura 4.33 – Fluxograma do programa implementado para as estações base.	70
Figura 4.34 – Diagrama funcional do <i>software</i> implementado para o sistema de rádio localização.	71
Figura 4.35 – Janela de configuração dos parâmetros do modelo.	72
Figura 4.36 – Interface com o utilizador do <i>software</i> implementado.	72

Figura 4.37 – Janela de configuração dos parâmetros temporais de pesquisa da trajetória.	73
Figura 5.1 – Localização e definição dos cenários 1 e 2.	75
Figura 5.2 – Resultados obtidos pela estação base 1, no ensaio nº 1.	76
Figura 5.3 – Resultados obtidos pela estação base 2, no ensaio nº 1.	76
Figura 5.4 – Resultados obtidos pela estação base 3, no ensaio nº 1.	76
Figura 5.5 – Presença de obstáculos na propagação das ondas de rádio.	77
Figura 5.6 – Tempo de propagação do sinal detetada pela estação base 1, no ensaio nº 1.	78
Figura 5.7 – Tempo de propagação do sinal detetada pela estação base 2, no ensaio nº 1.	78
Figura 5.8 – Tempo de propagação do sinal detetada pela estação base 3, no ensaio nº 1.	78
Figura 5.9 – Resultados obtidos pela estação base 1, no ensaio nº 2.	79
Figura 5.10 – Resultados obtidos pela estação base 2, no ensaio nº 2.	79
Figura 5.11 – Resultados obtidos pela estação base 3, no ensaio nº 2.	79
Figura 5.12 – Localização do ensaio nº 6 e das estações base.	81
Figura 5.13 – Estimativa da localização sem a implementação de filtros, ensaio nº 3.	81
Figura 5.14 – Estimativa da localização recorrendo ao filtro de média ponderada, ensaio nº 3.	82
Figura 5.15 – Estimativa da localização com a implementação do filtro de partículas, ensaio nº 3.	82
Figura 5.16 – Localização do ensaio nº 4 e das estações base.	84
Figura 5.17 – Estimativa da localização sem a implementação de filtros, ensaio nº 4.	84
Figura 5.18 – Estimativa da localização com recurso ao filtro de média ponderada, ensaio nº 4.	85
Figura 5.19 – Estimativa da localização com a implementação do filtro de partículas, ensaio nº 4.	85
Figura 5.20 – Localização do ensaio nº 8 e das estações base.	87
Figura 5.21 – Estimativa da localização sem a implementação de filtros, ensaio nº 5.	87
Figura 5.22 – Estimativa da localização com a implementação do filtro de partículas, ensaio nº 5.	88
Figura 5.23 – Localização do ensaio nº 6 e das estações base.	88
Figura 5.24 – Estimativa da localização sem a implementação de filtros, ensaio nº 6.	89
Figura 5.25 – Estimativa da localização com a implementação do filtro de partículas, ensaio nº 6.	89
Figura 5.26 – Conjunto de dados escritos na base de dados, durante o ensaio nº 4.	90
Figura 5.27 – Monitorização da trajetória do dispositivo móvel, durante o ensaio nº 5.	91
Figura 5.28 – Monitorização da trajetória do dispositivo móvel, durante o ensaio nº 6.	91
Figura 5.29 – Região linear da relação entre a distância e o RSSI_ADC	92
Figura 8.1 – Configurações de <i>hardware</i> do microcontrolador.	101
Figura 8.2 – Função de configuração do oscilador.	101
Figura 8.3 – Função de configuração e inicialização de <i>TMR0</i> e <i>TMR1</i>	101
Figura 8.4 – Função de configuração e inicialização dos <i>IO</i>	102
Figura 8.5 – Função de configuração e inicialização do <i>ADC</i>	102
Figura 8.6 – Função de configuração e inicialização da <i>UART</i>	102
Figura 8.7 – Função de configuração e inicialização da <i>SPI</i>	103
Figura 8.8 – Funções de configuração e inicialização das interrupções.	103
Figura 8.9 – Definições de <i>hardware</i> e registos do <i>transceiver</i> rádio MRF49XA	104
Figura 8.10 – Função de configuração e inicialização do <i>transceiver</i> rádio.	104
Figura 8.11 – Função de configuração e inicialização do <i>transceiver</i> rádio - continuação.	105
Figura 8.12 – Função para transmitir uma mensagem pelo <i>transceiver</i> rádio.	106
Figura 8.13 – Funções modo de transmissão, recepção e adormecido.	106
Figura 8.14 – Configurações do “Watchdog”.	107
Figura 8.15 – Bloco do programa para recepção e filtragem de mensagens, dispositivo móvel.	107
Figura 8.16 – Programa principal implementado para o dispositivo móvel.	108
Figura 8.17 – Programa principal implementado para a estação base repetidor.	108
Figura 8.18 – Bloco do programa para recepção e filtragem de mensagens, estação base repetidor.	109

Figura 8.19 – Programa principal implementado para a estação base.	110
Figura 8.20 – Bloco do programa para recepção e filtragem de mensagens, estação base.	111
Figura 9.1 – Filtragem e processamento, parte 1.	113
Figura 9.2 – Filtragem e processamento, parte 2.	114
Figura 9.3 – Algoritmo de localização.	114
Figura 10.1 – Algoritmo de localização - MATLAB.	115

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relação entre o comprimento da antena e a directividade, antena dipolo [33].	13
Tabela 3.1 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amostras obtidas.	35
Tabela 4.1 – Dimensionamento dos componentes para as diversas frequências.	55
Tabela 5.1 – Tabela com os resultados obtidos pelos três métodos, ensaio nº 3.	83
Tabela 5.2 – Tabela com os resultados obtidos pelos três métodos, ensaio nº 4.	86

ABREVIATURAS

ADC – Analog to Digital Converter

AOA – Angle of Arrival

EPROM – Erasable Programmable Read Only Memory

FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum

FIFO – First In First Out

ICSP – In Circuit Serial Program

IO – Input Output

ISM – Industrial, Scientific and Medical

MLE – Maximum Likelihood Estimation

PLL – Phase Locked Loop

RSSI – Received Signal Strength Indication

SCUT – Sem Custos para os Utilizadores

TDOA – Time Difference of Arrival

TOA – Time of Arrival

UART – Universal Asynchronous Receiver Transmitter

1 INTRODUÇÃO

A localização de pessoas ou bens usando técnicas de rádio localização, tem atualmente despertado algum interesse, tanto a nível académico como também a nível industrial, devido às suas diversas aplicações possíveis.

A indústria tem demonstrado um grande interesse nesta área, no sentido de poder gerir melhor os seus recursos, potenciando assim uma maior segurança e otimização dos seus processos de produção.

A ideia subjacente ao presente trabalho nasceu de uma consulta realizada por uma empresa cuja atividade se centra na exploração e comercialização de animais. No entanto, dado o valor comercial dos mesmos, era necessário monitorizar constantemente a sua localização dentro da quinta, tendo em conta que muitos deles fugiam da área cercada.

Assim sendo, e para dar resposta à solicitação anteriormente mencionada propus a realização de um sistema de localização de qualquer tipo de animais e ou objetos em ambientes exteriores, de baixo custo, fiável e em que as unidades móveis (localizadas) em cada animal fossem energeticamente independentes.

Neste trabalho pretende-se apresentar uma solução de engenharia, de um sistema de rádio localização baseado numa rede de estações base. A determinação da localização de um dispositivo rádio móvel é baseada no nível de potência do sinal rádio recebido designado na literatura anglo-saxónica por *Received Signal Strength Indication* (RSSI) e do tempo de propagação do sinal no espaço. Para o efeito, no âmbito do projeto de mestrado foram desenvolvidos dispositivos rádio móveis e fixos, e um *software* de gestão, processamento e monitorização da localização dos dispositivos rádio móveis.

O crescimento acentuado das tecnologias da eletrónica analógica, digital e rádio frequência, durante os últimos 100 anos, contribuiu para o desenvolvimento de diversos sistemas de localização rádio, podendo estes serem caracterizados por diversas categorias em função das diferentes técnicas utilizadas e o propósito a que se destina.

Como se pode verificar, apesar de existirem muitas técnicas de rádio localização, não existe nenhuma técnica que seja válida em todos os ambientes, para cada situação torna-se necessário fazer uma análise prévia de forma a escolher a técnica que melhor se adequa a situação em questão, de modo a obter o melhor desempenho possível.

1.1 Objectivos e Metodologia

1.1.1 Objectivos do projecto

O objectivo do presente trabalho consiste no estudo, desenvolvimento e implementação de um sistema de rádio localização. Este trabalho pretende ser um projecto-piloto na demonstração da utilização de um sistema de rádio localização a implementar numa quinta de exploração de animais, cujas áreas são 2500 hectares.

Para o efeito pretende-se desenvolver e implementar um sistema de rádio localização de dimensões mais reduzidas, na ordem dos 2 hectares. A escolha de uma área bastante mais reduzida deve-se ao facto de neste projecto se pretender validar as técnicas de rádio localização de modo a ser possível implementar na prática o mesmo sistema mas a uma escala maior, também ajuda a minimizar os custos associados ao projecto, pois implica dispositivos rádios de menor potência e a dispensa de outros materiais necessários se a área fosse os 2500 hectares.

O projecto nasceu em março de 2012, a partir da consulta de um criador de animais, que apresentou como problema a dificuldade em localizar os animais em tempo real, quando os mesmos se encontravam fora da sua área predefinida. Tratando-se de um desafio interessante do ponto de vista tecnológico e de uma boa oportunidade de negócio, apresentou-se uma solução de engenharia no sentido de responder às necessidades pretendidas. No entanto como se trata de uma área com alguma complexidade, surge a necessidade de desenvolver e implementar numa escala mais pequena a solução pretendida.

1.2 Estrutura do relatório do projecto

O presente documento encontra-se dividido em três partes principais, numa primeira parte, encontra-se descrito todo o trabalho de pesquisa bibliográfico, numa segunda parte, é apresentado uma proposta de um sistema de rádio localização, onde os métodos são descritos e aplicados. Por último são apresentados os resultados experimentais e as suas conclusões.

Capítulo 2 – É feita uma abordagem teórica sobre a propagação de sinais rádio, o capítulo aborda o conceito de onda de rádio, antenas e modelos de propagação de sinais rádio.

Capítulo 3 – São descritas as principais técnicas de localização, como também métodos de filtragem.

Capítulo 4 – Neste capítulo é apresentado uma proposta do sistema de rádio localização a implementar, onde se descreve a topologia, o protocolo de comunicações, a plataforma de *hardware* e o *software* de monitorização do sistema desenvolvido.

Capítulo 5 – São apresentados os cenários de teste, os resultados obtidos experimentalmente e a respectiva análise dos resultados.

Capítulo 6 – São apresentadas as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Por último, de forma a complementar o relatório são apresentados três anexos:

Anexo 1 – Estrutura comum do *Firmware* da plataforma de *hardware*.

Anexo 2 – *Software* de monitorização do sistema.

Anexo 3 – Algoritmo de localização por lateração circular em MATLAB.

2 Propagação de sinais rádio

2.1 Ondas de rádio.

As ondas de rádio são campos electromagnéticos de alta frequência radiados através de uma antena por um rádio transmissor. Na sua forma original, isto é sem modulação, o transmissor rádio irradia através da sua antena uma onda electromagnética alternada sinusoidal para o espaço livre, a frequência da onda radiada é denominada por frequência da onda portadora.

Para transportar um sinal de informação através de uma onda de rádio, é necessário fazer passar a onda portadora por um processo de modulação, isto é, modifica-se a onda portadora de modo a que a onda resultante seja a combinação do sinal de informação com a onda portadora. Na recepção, o receptor executa a operação inversa conhecida por desmodulação, que consiste em retirar o sinal de informação da onda portadora.

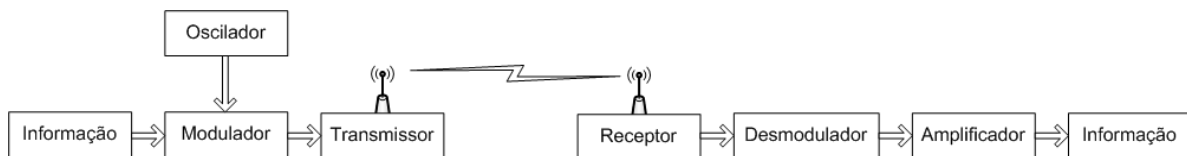


Figura 2.1 – Diagrama de blocos de um sistema transmissor/receptor rádio [2].

A origem de uma onda de rádio resulta da oscilação de uma corrente eléctrica num condutor eléctrico. Se a corrente eléctrica for alternada, isto é, se a intensidade e a polaridade da corrente variarem ao longo do tempo expressão (1), em redor do condutor eléctrico irá surgir um campo magnético \vec{H} de intensidade variável e com alternância de polaridade, acompanhando as mesmas variações da corrente eléctrica. O campo magnético \vec{H} ao variar vai originar no plano ortogonal ao plano do campo magnético \vec{H} , um campo eléctrico \vec{E} , com as mesmas características do campo magnético \vec{H} , por sua vez e devido as variações do campo eléctrico \vec{E} , cada linha representativa do campo eléctrico \vec{E} irá dar origem a uma nova linha de campo magnético \vec{H} , este processo é repetido sucessivamente dando origem a propagação da onda de rádio pelo espaço livre.

$$i(t) = I_{MAX} * \sin(2 * \pi * f * t) \quad (1)$$

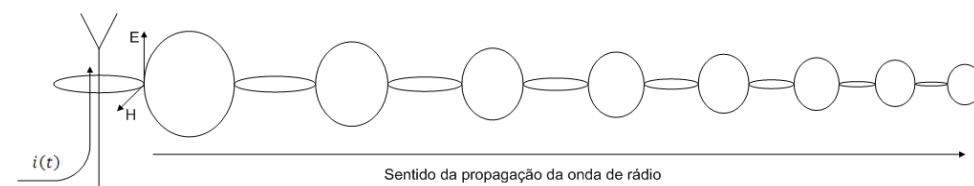


Figura 2.2 – Propagação de uma onda de rádio, campos \vec{H} e \vec{E} radiados por uma antena vertical [2].

Cada linha de campo magnético \vec{H} dá origem a uma quantidade infinita de linhas de campo eléctrico \vec{E} , por sua vez cada linha de campo eléctrico \vec{E} dá origem a uma outra quantidade infinita de linhas de campo magnético \vec{H} , e assim sucessivamente propagando a onda de rádio pelo espaço livre.

De acordo com a figura anterior podemos verificar que tanto o campo magnético \vec{H} e o campo eléctrico \vec{E} possuem uma determinada direcção, que depende da orientação da antena, a direcção do campo eléctrico \vec{E} define o tipo de polarização da onda de rádio. A polarização da onda de rádio é definida pela direcção do campo eléctrico em relação à superfície da Terra, quando o campo eléctrico é perpendicular ao solo, a polarização da onda de rádio é denominada de polarização vertical, quando o campo eléctrico é paralelo ao solo a polarização da onda de rádio é denominada de polarização horizontal. A maior transferência de energia entre o transmissor e o receptor ocorre quando ambas as antenas se encontram na mesma posição de polarização.

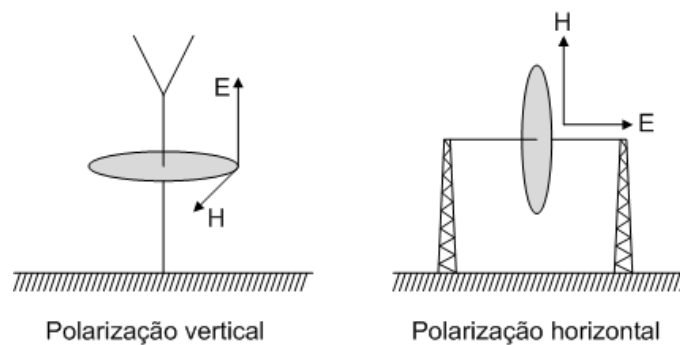


Figura 2.3 – Classificação da onda de rádio em função da polarização [2].

Uma onda de rádio propaga-se no espaço livre à velocidade da luz no vácuo, a cerca de $3 \cdot 10^8$ m/s, sendo o comprimento de onda o resultado da relação entre a velocidade da luz no vácuo e o valor da frequência portadora expressão (2).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Em que:

- λ – Comprimento de onda em metros.
- c – Velocidade da luz no vácuo em metros por segundo.
- f – Valor da frequência portadora em Hz.

Na propagação de uma onda de rádio, existem perdas de energia, essas perdas são conhecidas por atenuação da onda devido ao espaço livre, que depende do comprimento de onda e da distância percorrida pela onda expressão (3). Para facilitar os cálculos recorre-se a expressão

que define a atenuação da onda devido ao espaço livre em dB expressão (4). A importância de saber o valor da atenuação é permitir determinar o nível de potência do sinal rádio recebido P_{RX} , conhecendo o nível de potência do sinal a transmitir P_{TX} , desprezando outras atenuações e considerando o ganho das antenas como unitário, o nível de potência do sinal recebido P_{RX} é determinado pela expressão (5).

$$L_{fs} = \left(\frac{4 * \pi * d}{\lambda} \right)^2 \quad (3)$$

$$L_{fs}(dB) = 92.442 + 20 * \log_{10}(f) + 20 * \log_{10}(d) \quad (4)$$

$$P_{RX} = P_{TX} - L_{fs} \quad (5)$$

Em que:

P_{RX} – Nível de potência do sinal recebido, em dBm ou dBW.

P_{TX} – Nível de potência do sinal transmitido, em dBm ou dBW.

$L_{fs}(dB)$ – Atenuação da onda devido ao espaço livre, em dB.

d – Distância entre o transmissor e o receptor, em quilómetros.

f – Frequência do sinal, em Gigahertz.

2.2 Antenas.

Uma antena é um componente usado nos sistemas rádio para radiar ondas electromagnéticas no caso dos rádios transmissores e para captar no caso dos rádios receptores. Durante uma transmissão a antena converte o sinal de corrente gerado pelo transmissor em ondas electromagnéticas, na recepção a antena converte uma onda electromagnética numa corrente.

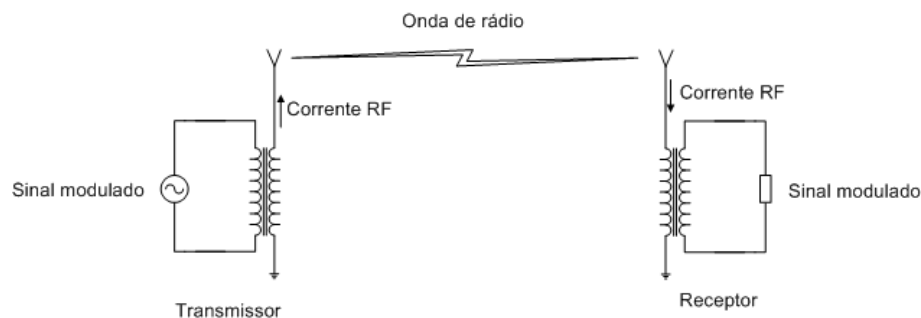


Figura 2.4 – Transmissão de uma onda de rádio.

A construção de uma antena normalmente depende do tipo de aplicação, tendo sempre em consideração a frequência de funcionamento, ganho e directividade, como existem vários tipos de antenas, as mesmas podem ser agrupadas em classes de acordo com o seu modo de construção:

Antena filiforme – Trata-se de uma antena feita a partir de um fio condutor eléctrico.

Antena de tubos metálicos – É uma antena feita a partir de tubos de cobre ou alumínio, normalmente ocos para se tornarem mais leves.

Antena de fitas metálicas – É uma antena construída a partir de fitas metálicas paralelas.

Antena de abertura – São antenas cuja radiação ocorre através de uma abertura, de modo a obter um ganho elevado.

Antena microstrip – Trata-se de um tipo de antena integrada numa placa de circuito impresso. O modo de construção consiste numa pista metálica (elemento radiante) separado do seu plano de terra por uma camada de substrato dieléctrico.

2.2.1 Antena dipolo de meio comprimento de onda.

Para entender melhor o princípio de funcionamento de uma antena, será analisado a antena dipolo, a antena dipolo é uma antena que pode ser construída a partir de dois fios condutores metálicos, como mostra a figura seguinte.

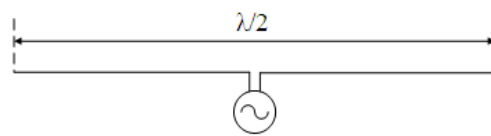


Figura 2.5 – Antena dipolo de meia onda.

Este tipo de antena é denominado de antena dipolo, por ser constituída por dois pólos, se o comprimento de cada um dos pólos corresponder a um quarto do comprimento de onda, a antena tem a designação de antena dipolo de meia onda. Trata-se de uma antena cuja irradiação das ondas electromagnéticas encontra-se optimizada. Da figura seguinte observa-se que a distribuição da corrente RF atinge o seu máximo no centro da antena e é nula nos extremos, por sua vez a distribuição do potencial eléctrico \vec{E} atinge o máximo nos extremos e é nula no centro.

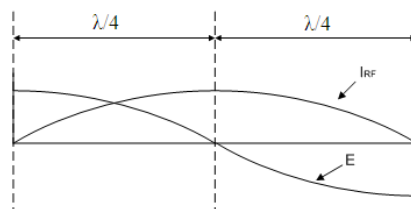


Figura 2.6 – Distribuição da corrente RF e potencial eléctrico E, na antena dipolo.

Uma vez que o potencial eléctrico \vec{E} na antenna dipolo de meia onda é máximo nos extremos, será criado entre os extremos um campo eléctrico, campo eléctrico esse que será radiado para o espaço.

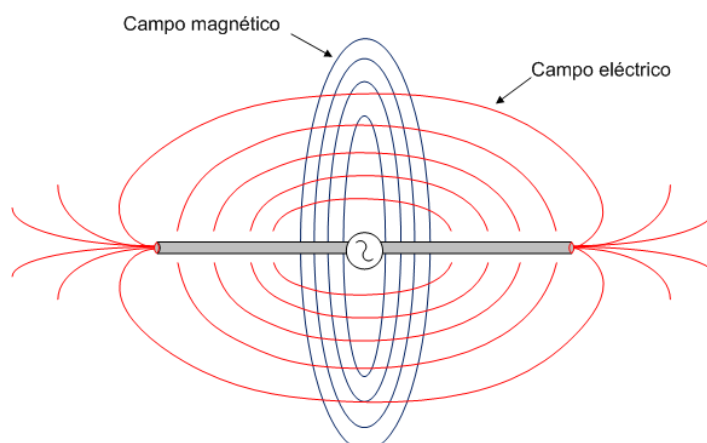


Figura 2.7 – Campo magnético e eléctrico, gerados pela antenna dipolo.

Conforme foi descrito anteriormente, o campo eléctrico resulta do campo magnético gerado pelo fluxo de corrente RF na antenna, que será máximo no centro da antenna visto ser o ponto onde a corrente RF é máxima. Ao gerar-se a interacção entre os campos magnéticos e eléctricos, a onda electromagnética irá propagar-se no espaço visto que cada linha de campo eléctrico irá criar um novo campo magnético, e esta por sua vez irá criar um novo campo eléctrico e assim sucessivamente, dando origem a propagação da onda de rádio pelo espaço. Uma das características mais importantes de uma antenna é o seu diagrama de radiação, o diagrama de radiação é uma projecção do volume de energia radiada nos planos horizontal e vertical, as áreas com concentração de energia são denominadas de lóbulos.

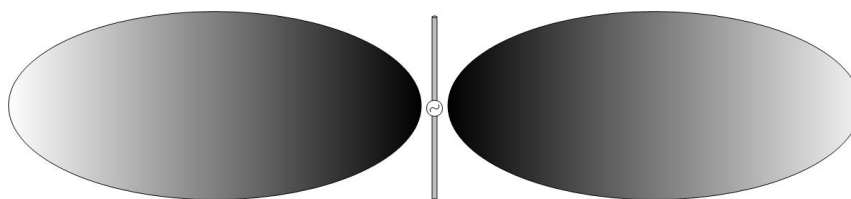


Figura 2.8 – Diagrama de radiação vertical [2].

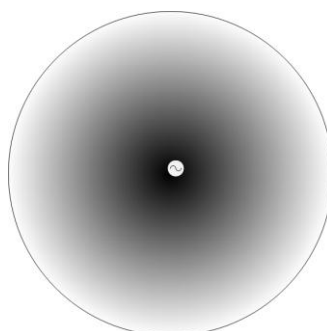


Figura 2.9 – Diagrama de radiação horizontal.

Pela análise dos diagramas de radiação horizontal e vertical, podemos verificar que para a antena dipolo de meia onda, na projecção horizontal a irradiação encontra-se distribuída de igual modo pelos 360 graus, o qual poderemos dizer que no plano horizontal a antena é omnidireccional, na projecção vertical a irradiação encontra-se distribuída em dois lóbulos espalhados no plano horizontal, sendo de destacar a ausência de irradiação no prolongamento do eixo da antena.

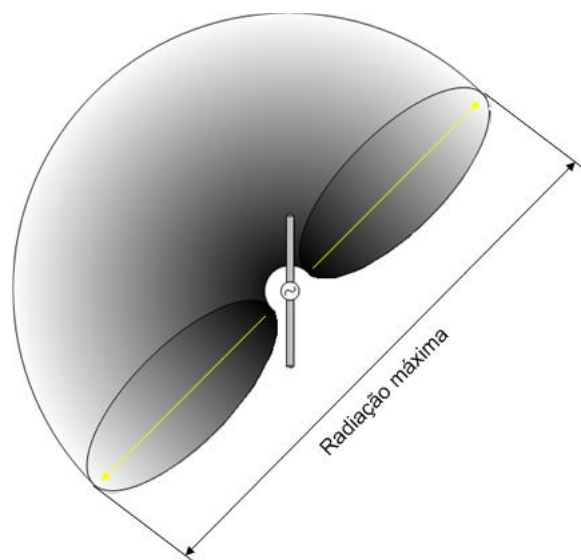


Figura 2.10 – Diagrama de radiação em três dimensões, antena dipolo de meia onda.

2.2.2 Antena monopolo de um quarto comprimento de onda.

A antena dipolo de meia onda, quando instalada em polarização vertical e junto a terra, apenas necessita de um quarto do comprimento de onda (antena monopolo), para produzir o mesmo efeito de uma antena de meio comprimento de onda, visto que terra servirá de espelho para o outro quarto comprimento de onda. Este fenómeno acontece devido ao facto da terra reflectir as ondas de rádio, repare-se que o ideal neste cenário é que a terra tenha uma boa condutividade, por exemplo terrenos húmidos com solo fertilizado ou então terrenos salinizados, em cenários cuja condutividade não seja o ideal, esta barreira pode ser ultrapassada com a instalação de radiais (mínimo 4) com comprimento de um quarto de comprimento de onda de modo a criar uma terra artificial. No entanto algumas diferenças devem ser referenciadas, tal como a redução para metade da impedância de entrada da antena e a alteração do diagrama de radiação.

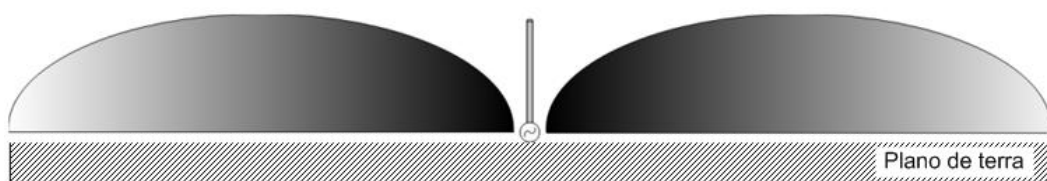


Figura 2.11 – Diagrama de radiação vertical, antena monopolo de $\frac{1}{4} \lambda$.

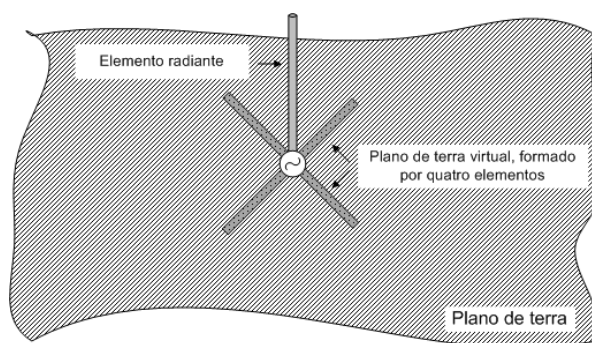


Figura 2.12 – Colocação de radiais de modo a criar uma terra artificial.

2.2.3 Ganho e directividade.

Em certos cenários é necessário restringir dentro de certos limites a direcção da onda radiada, de modo a melhorar a eficiência do sistema, por exemplo para uma rádio local que se localize junto a uma zona costeira, não há nenhum interesse em radiar uma parte da potência em direcção do mar, pois essa potência seria desperdiçada, o melhor seria que essa potência radiada fosse canalizada para a direcção que nos interessa e que para o lado do mar não existisse nenhuma irradiação.

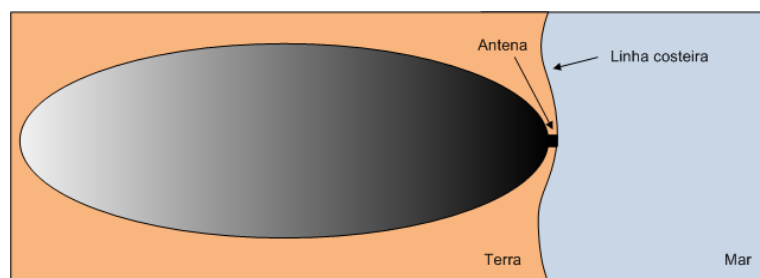


Figura 2.13 – Direcctionar a irradiação de uma antena para uma direcção.

A directividade \mathbf{D} de uma antena é a propriedade de cada tipo de antena de radiar mais fortemente em algumas direcções que em outras, a directividade pode ser quantificada quando comparada com uma antena isotrópica (antena que irradia para todas as direcções de igual modo) cuja directividade é a própria unidade $\mathbf{D} = 1$, quanto maior for a directividade maior é a concentração da potência radiada numa direcção.

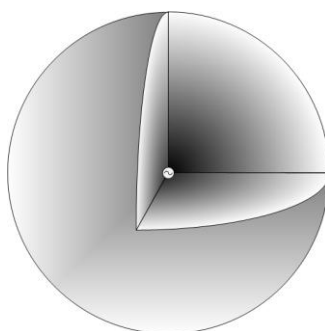


Figura 2.14 – Diagrama de radiação de uma antena isotrópica.

Partindo da antena isotrópica, o volume de energia terá a forma de uma esfera de raio r que irá envolver a antena localizada no centro da esfera, conforme a figura anterior. Se a potência radiada for W , em watt, sendo a superfície da esfera a expressão (6), a componente radial da potência radiada P_R em watt por metro quadrado pode ser definida pela expressão (7).

$$s = 4 * \pi * r^2 \quad (6)$$

$$P_r = \frac{W}{4 * \pi * r^2} \quad (7)$$

O valor da potência radiada P_R corresponde a potência por unidade de área ou a densidade de potência sobre a superfície da esfera. Nas mesmas condições de envolvimento da esfera, uma outra antena poderá apresentar determinadas regiões com maior densidade de potência e dessa forma apresentar uma directividade diferente. Multiplicando a densidade de potência P_R pelo quadrado do raio r , resulta a intensidade de radiação U em potência por ângulo sólido expressão (8).

$$U = P_r * r^2 \quad (8)$$

Considerando que a intensidade de radiação é máxima U_{MAX} na direcção entre o rádio transmissor e o rádio receptor, a directividade D pode ser expressa pela razão entre a intensidade de radiação máxima U_{MAX} pela intensidade de radiação média U_{MED} , expressão (9). A intensidade de radiação média U_{MED} , pode ser obtida dividindo o valor da potência radiada pelos $4 * \pi$ esterradiano (sr) correspondentes a todas as direcções. A largura do feixe a meia potência é obtida medindo o ângulo entre os dois pontos onde a intensidade de radiação corresponde a metade do valor máximo.

$$D = \frac{U_{MAX}}{U_{MED}} \quad (9)$$

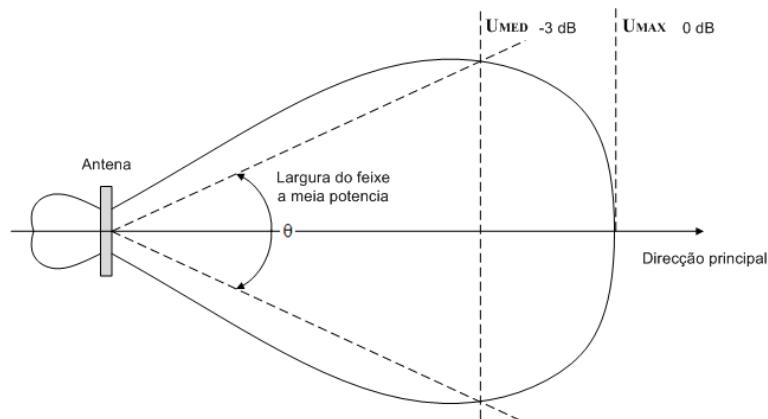


Figura 2.15 – Lóbulo principal de radiação de uma antena [2].

O valor numérico da directividade **D** pode ser transformado em dB, através da expressão (10).

$$D_{(dB)} = 10 * \log_{10}(D) \quad (10)$$

Pela expressão (11) podemos definir o ganho da antena em relação a antena isotrópica, sendo o ganho da antena **G** igual a multiplicação do rendimento da antena **η** pelo valor da directividade **D** expresso em dBi expressão (11), o índice **i** indica que o ganho da antena é referenciado a antena isotrópica.

$$G = \eta * D \quad (11)$$

A directividade ou ganho direccionado de uma antena pode ser manipulada, no caso das antenas dipolo e monopolo, modificando o comprimento da antena ou usando um agregado de dois ou mais elementos de antena. Por exemplo ao aumentar o comprimento de uma antena dipolo de $\lambda/2$ para λ , a directividade aumenta de **D** = 1,64 para **D** = 1,8, a tabela seguinte mostra a relação entre o comprimento da antena e a directividade, para uma antena dipolo.

Antena dipólo	
L em λ	D
$\ll 1$	1.50
0.5	1.64
1.0	1.80
1.5	2.00
2.0	2.30
3.0	2.80
4.0	3.50
8.0	7.10

Tabela 2.1 – Relação entre o comprimento da antena e a directividade, antena dipolo [33].

Com recurso a mais elementos de antena, reflectores e directores é possível manipular a directividade de uma antena dipolo. Um elemento de antena que não esteja ligado a linha de transmissão, mas esteja no mesmo plano que o dipolo, irá desenvolver uma tensão por indução, se considerarmos que a energia radiada na direcção do elemento de antena viaja $\frac{1}{4} \lambda$, antes de atingir o elemento de antena a onda de rádio sofre um desfasamento de 90 graus, a medida que a onda de rádio intercepta o elemento de antena, é induzido uma tensão que se encontra 180 graus em relação a onda que a induziu, como resultado uma corrente RF irá atravessar o elemento e radiar a onda de rádio. Na direcção para além do elemento de antena, o campo por ele radiado é oposto ao campo produzido pelo dipolo, pelo que os dois campos se anulam, contudo o elemento de antena também irradia no sentido do dipolo, quando esta atinge o dipolo, a onda de rádio já sofreu mais 90 graus de desfasamento, fazendo com que o desfasamento total seja de 360 graus e a onda de rádio chega em fase com a energia que esta a ser radiada pelo dipolo, reforçando assim a radiação na direcção do dipolo originando um novo máximo de radiação.

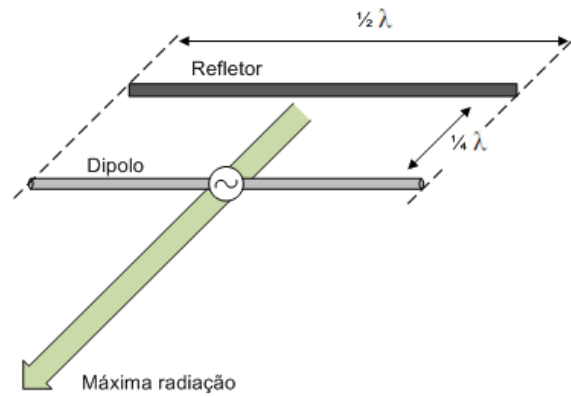


Figura 2.16 – Antena dipolo com refletor [38].

A condição mais favorável para o refletor é obtida quando o refletor está afastado $0,18 \lambda$ a $0,20 \lambda$ do dipolo e quando o seu comprimento é de aproximadamente 5% maior do que $\lambda/2$. No entanto a directividade pode ser aumentada com a adição de um terceiro elemento, chamado de director, o director deve ter o comprimento 5% menor do que $\lambda/2$ e deve estar afastado do dipolo aproximadamente $0,1 \lambda$.

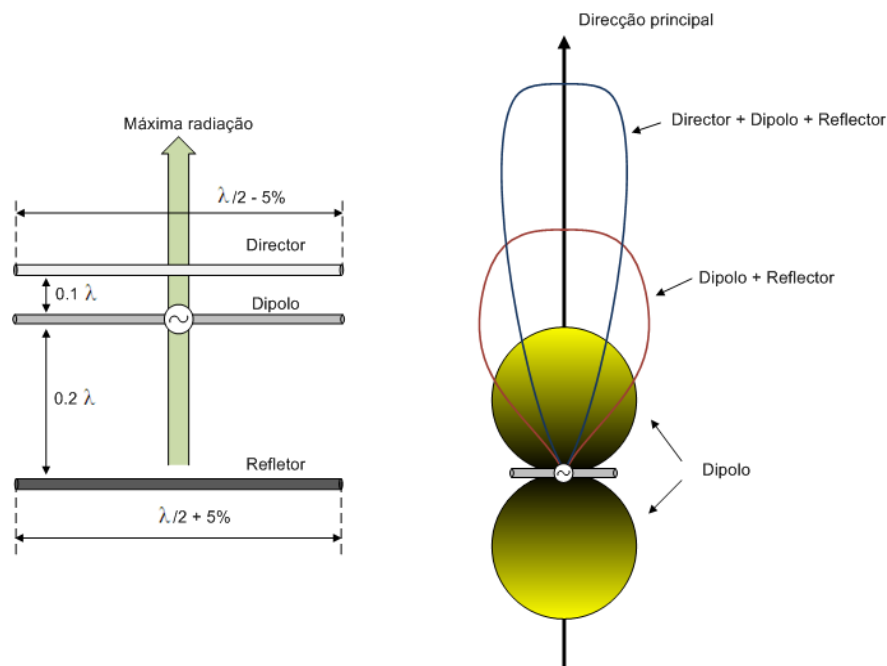


Figura 2.17 – Antena dipolo com refletor e director [38].

Com recurso a reflectores planos, de canto e curvos, também é possível manipular a directividade de uma antena dipolo, um refletor plano é uma folha metálica plana e rectangular com dimensões λ por $\lambda/2$, que actua como refletor da antena dipolo, a direcção do feixe principal é perpendicular a folha metálica com o centro situado no meio da antena dipolo. O ganho de antena dipolo com este tipo de refletor é na ordem dos 5 dBi.

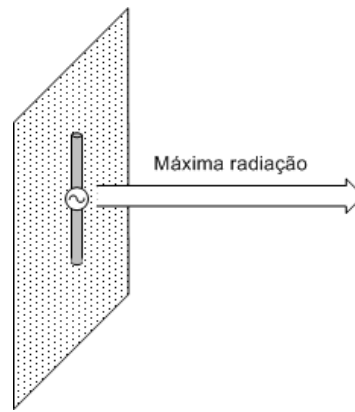


Figura 2.18 – Antena dipolo com refletor plano [2].

O refletor de canto, é baseado no mesmo princípio do refletor plano, difere no sentido de utilizar duas folhas metálicas planas, que formam um ângulo α entre si, o ganho da antena dipolo com este tipo de refletor é na ordem dos 9 dBi.

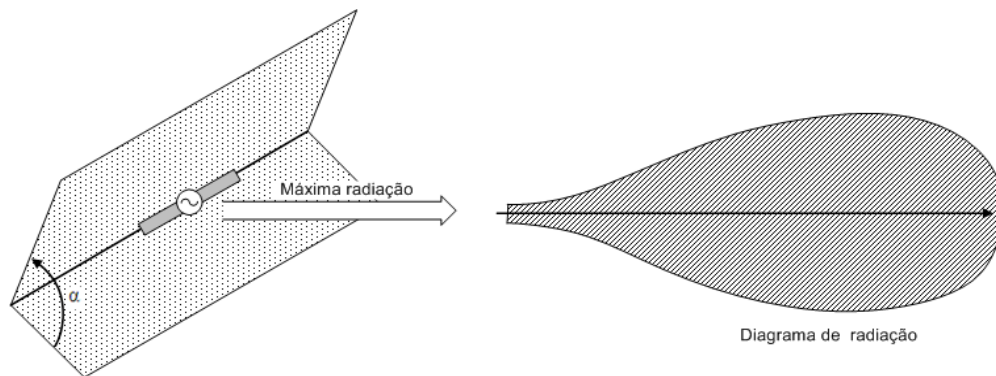


Figura 2.19 – Antena dipolo com refletor de canto [2].

O refletor curvo, é baseado no refletor de canto, difere na sua construção, pois possui um formato cilíndrico, parabólico ou parabolóide, o ganho da antena dipolo com este tipo de refletor é na ordem dos 20 dBi.

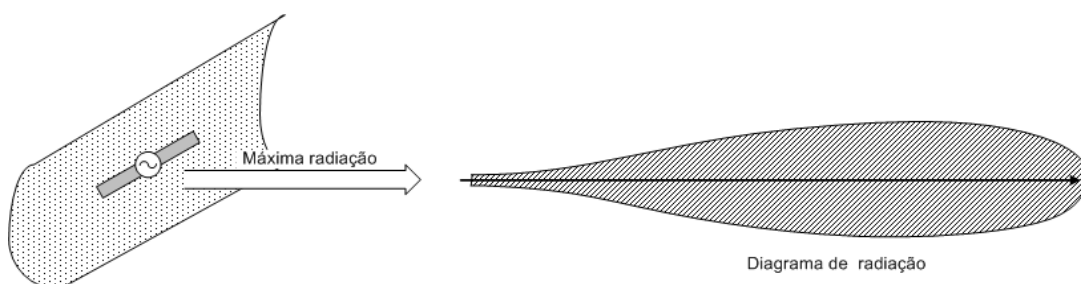


Figura 2.20 – Antena dipolo com refletor de curva.

Pelo que foi descrito nas linhas acima, podemos verificar que é possível construir uma antena cujo diagrama de radiação se enquadre com as necessidades pretendidas, é de referenciar que o tamanho da antena é proporcional ao comprimento de onda da frequência portadora, sendo que quanto menor for a frequência portadora, maior será as dimensões da antena. Com recurso a reflectores é possível manipular o diagrama de radiação de modo a abranger um determinado volume sobre uma determinada área, deste modo minimizando os desperdícios de irradiação de energia.

2.2.3.1 Antena Cardioide.

A antena cardioide é um tipo de antena que possui características interessantes para implementação de sistemas de rádio localização, baseados na medição do nível de potência do sinal recebido RSSI. A principal característica da antena cardioide consiste na forma do diagrama de radiação no plano horizontal, que para um certo arco formado entre dois pontos, o diagrama de radiação no plano horizontal é praticamente constante, ao contrário do que acontece com o uso de refletores. O princípio de construção de uma antena cardioide é baseado num agregado de duas ou mais antenas omnidireccionais distanciadas entre si, de modo a que o sinal de alimentação das várias antenas se encontre desfasadas entre si. A diferença de fase na alimentação das antenas irá provocar uma radiação da energia no plano horizontal em forma de cardioide, no plano vertical o diagrama de radiação da energia tem o mesmo comportamento como se tratasse do uso de um refletor.

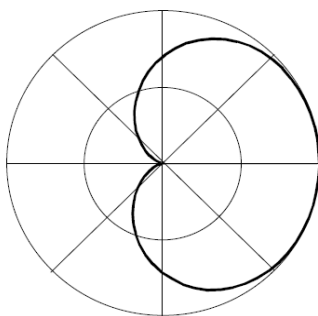


Figura 4.21 – Diagrama de radiação em forma de cardioide.

As figuras seguintes ilustram duas antenas cardioide do fabricante *SKYMATS* e seus respectivos diagramas de radiação.

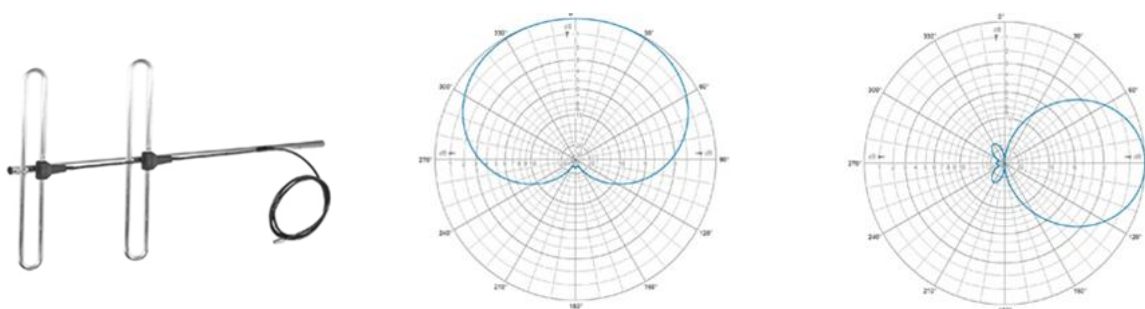


Figura 2.22 – Antena cardioide S.CDA de 2 elementos e diagrama de radiação H e V.

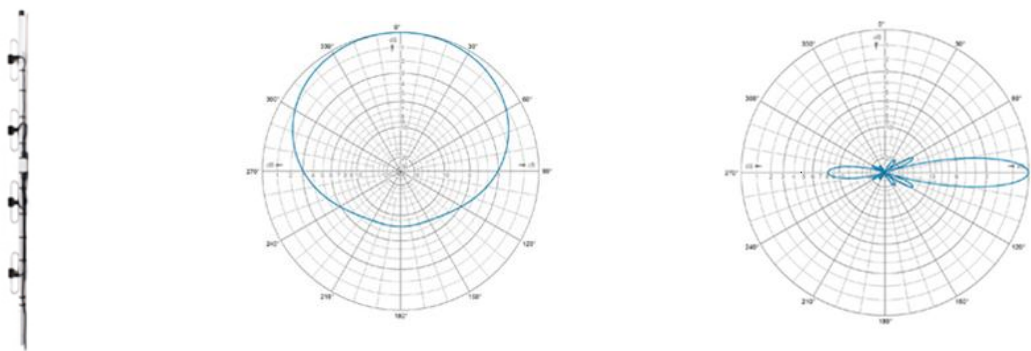


Figura 2.23 – Antena cardioide S.MA de 4 elementos e diagrama de radiação H e V.

Da análise dos diagramas de radiação horizontal das figuras anteriores, pode-se verificar que a área de abrangência da energia radiada pode ser otimizada recorrendo a antenas cardioide. Facilmente se constata que em relação a antenas omnidireccionais, as antenas cardioide permitem o aumento da área de cobertura em mais do que quatro vezes.

2.3 Modelos de propagação de sinais rádio.

Para a caracterização do canal rádio utilizou-se um modelo similar ao proposto por Shannon, que considera que o canal de comunicações é afectado em simultâneo por várias fontes de ruído. Esse estudo considera que as fontes de ruído produzem dois efeitos distintos sobre o sinal que transporta a informação, um de natureza multiplicativa que afecta directamente a amplitude e a fase do sinal considerado e outro de natureza puramente aditiva.

O ruído aditivo tem inúmeras origens possíveis, de entre elas refira-se o ruído térmico e impulsivo gerado pelos elementos passivos e activos do próprio receptor podendo estar-lhe associados outras causas como sejam os efeitos atmosféricos, a radiação cósmica e a interferência proveniente de outros transmissores e equipamentos eléctricos. Por outro lado a interferência de canal adjacente resulta da imperfeição na filtragem de componentes de frequência que se encontram fora da banda do canal.

O ruído multiplicativo, por seu lado, tem origem em diversos fenómenos físicos que afectam as ondas electromagnéticas no seu percurso desde a antena transmissora até à antena receptora, nomeadamente:

Nas características direccionais das antenas do transmissor e do receptor;

Na reflexão em superfícies planas como paredes, muros e montanhas;

Na difracção em obstáculos pontiagudos, telhados, cumes das montanhas;

Na refracção em materiais com diferentes índices de refacção como nas diferentes camadas atmosféricas;

Na absorção das paredes, árvores, vegetação e atmosfera;

Na dispersão em superfícies rugosas, como no terreno e nas folhas das árvores.

A análise do processo multiplicativo que afecta o sinal rádio é usualmente dividida em três partes distintas. A primeira diz respeito ao decréscimo da intensidade do campo electromagnético verificado à medida que se aumenta a distância entre o emissor e o receptor. Esta diminuição tem como causa a dispersão da potência do sinal radioelétrico à medida que este se propaga livremente no espaço. A energia radiada por uma antena isotrópica, propaga-se em todas as direcções, e à medida que a distância aumenta a energia radiada espalha-se por uma área cada vez maior e consequentemente, a densidade de campo diminui.

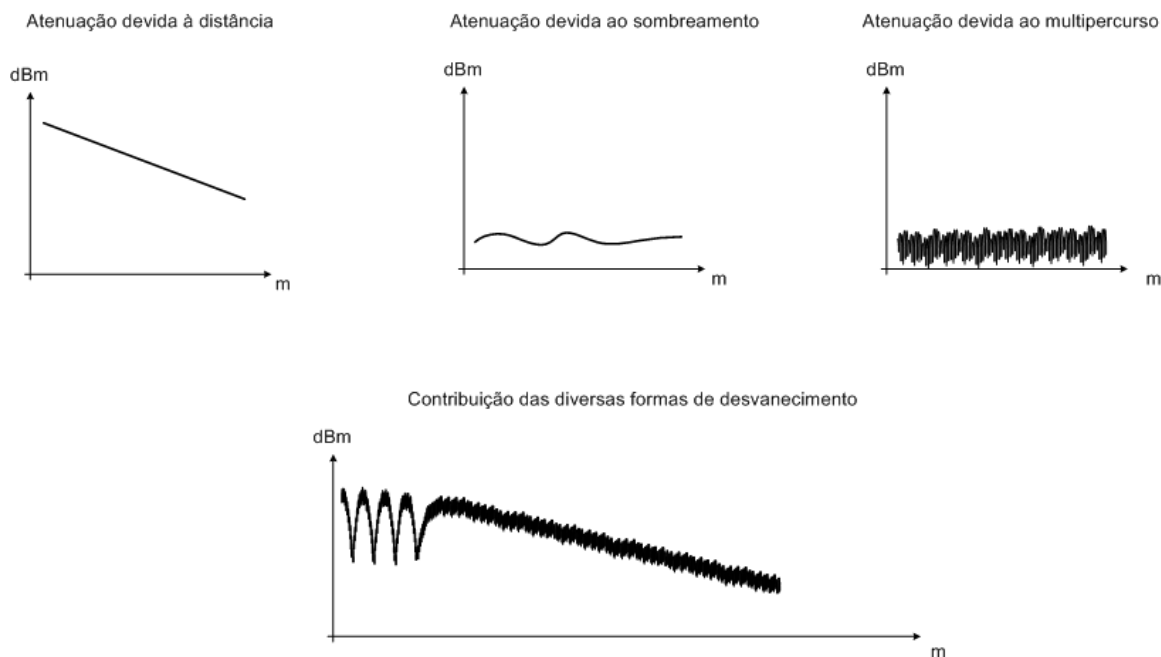


Figura 2.24 – Contribuição das diversas atenuações, na propagação da onda de rádio.

Em sistemas rádio é usual considerar a existência de perdas adicionais resultantes da presença de obstáculos no percurso de propagação, tais como edifícios, pontes e árvores sendo estas sobrepostas às referidas perdas em espaço livre. A área de sombra resultante, bem como a sua forma e percentagem de ocorrência serão fortemente dependentes do tipo de cenário. Finalmente, considera-se o desvanecimento resultante da interferência multi-percurso que provoca rápidas e profundas flutuações no nível de potência do sinal recebido. Em sistemas rádio este tipo de desvanecimento tem como principal origem o movimento dos utilizadores e/ou dos objectos do cenário. O sinal recebido é composto pelo sinal desejado e por outras componentes, essencialmente réplicas e ecos resultantes de reflexões ocorridas em objectos circundantes.

Antenas com diagramas de radiação muito abertos tendem a receber uma maior quantidade de

ecos do que as antenas directivas. As antenas montadas no topo dos veículos e os terminais portáteis podem receber reflexões especulares fortes provenientes do solo. As variações da potência recebida com o tempo são causadas pelo movimento do móvel e/ou de objectos reflectores.

2.3.1 Modelos de propagação

Os processos multiplicativos anteriormente descritos foram estudados e analisados. No que concerne às perdas em espaço livre utilizou-se a fórmula de Friis a qual resulta directamente da propagação das ondas electromagnéticas no vazio. A expressão (12) calcula o valor de potência recebida a partir do valor de potência transmitida e dos ganhos das antenas, através da seguinte fórmula:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{Total} \quad (12)$$

onde P_{Tx} representa a potência transmitida dentro da banda de recepção (dBW), G_{Tx} e G_{Rx} são os ganhos das antenas transmissora e receptora em (dB), e L_{Total} engloba o valor total das perdas ocorridas na transmissão (dB). Este último valor engloba às perdas de propagação espaço livre as perdas provocadas pela atmosfera terrestre, nomeadamente pelo oxigénio e vapor de água.

$$L_{total} = L_{fs} + L_{Atm} \quad (13)$$

As perdas em espaço livre L_{fs} são obtidas, por sua vez, a partir do seguinte cálculo, sendo d a distância entre o transmissor e o receptor e λ o comprimento de onda, ambos em metros.

$$L_{fs} = 10 * \log_{10} \left(\frac{4 * \pi * d}{\lambda} \right)^2 \quad (14)$$

De entre os diferentes gases constituintes da atmosfera verifica-se que somente o oxigénio e o vapor de água introduzem atenuações consideráveis nos sinais radioelétricos nas bandas de frequência utilizadas. O oxigénio possui um forte pico de absorção perto dos 57.2 GHz, que corresponde à frequência de ressonância das suas moléculas, enquanto que o vapor de água apresenta um pico de atenuação à frequência de 22.3 GHz.

2.3.2 Propagação de ondas de rádio – Modelo de 2 raios.

Na propagação de um sinal rádio em terra plana, entre um transmissor e um receptor, é necessário ter em consideração o efeito provocado pelas ondas secundárias, para analisar este efeito recorre-se ao modelo de reflexão por dois raios, este modelo de propagação de ondas de rádio entra em consideração com uma onda de rádio direta e uma outra refletida no solo, como se ilustra na figura 2.25.

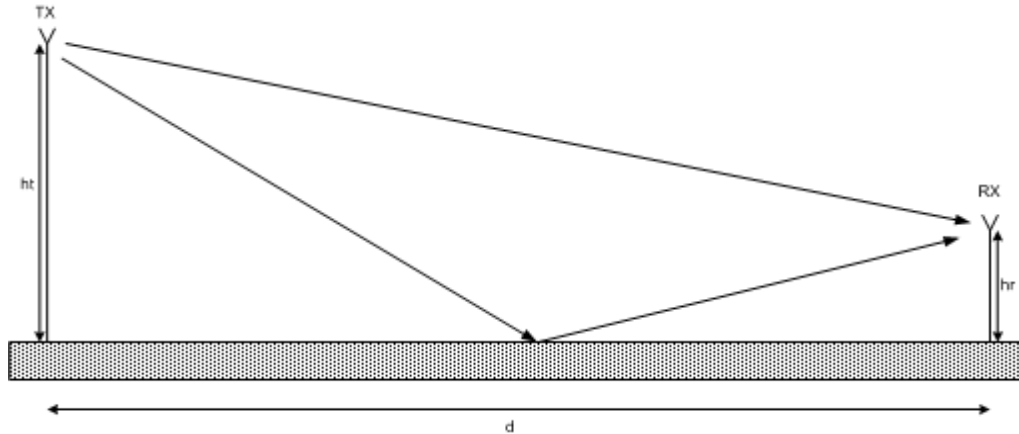


Figura 2.25 – Modelo de propagação de dois raios.

Neste modelo considera-se, que a distância entre o transmissor e o receptor, é muito maior comparando com a soma das alturas das antenas ($h_t + h_r$), pode-se considerar que a atenuação do sinal durante o percurso da onda de rádio, segue o modelo de propagação em terra plana, descrito na expressão (15).

$$PL = 40 * \log_{10}(d) - (10 * \log_{10}(G_{TX}) + 10 * \log_{10}(G_{RX}) + 20 * \log_{10}(H_t) + 20 * \log_{10}(H_r)) \quad (15)$$

Em que:

- P_L** – Atenuação devida a propagação em dBm.
- d** – Distância entre o transmissor e o receptor.
- G_{TX} e G_{RX}** – Ganho das antenas do transmissor e do receptor em dB.
- h_t e h_r** – Altura das antenas do transmissor e receptor em metros.

Da expressão (15) que define o valor da atenuação do sinal durante o percurso, podemos verificar que numa comunicação bidirecional em que o modulo rádio tem a função de transmissor e receptor em instantes de tempo diferentes, o modelo de propagação de dois raios continua a ser válido. A partir do modelo de propagação de dois raios, pretende-se obter em termos teóricos a distância mínima entre o transmissor e o receptor para o qual não será possível relacionar a distância em função do nível de potência do sinal recebido RSSI.

A figura 2.26 apresenta a variação do valor da potência recebida em dBm em função do valor da distância entre o transmissor e o receptor, considerando que a antena da estação base se encontra a três metros de altura e que as antenas dos móveis se encontram a um metro de altura. No sentido de aferir o modelo de propagação, efectuou-se uma campanha de medidas com o objectivo de comparar o modelo teórico com o resultado obtido experimentalmente. O resultado experimental encontra-se representado na figura 2.28.

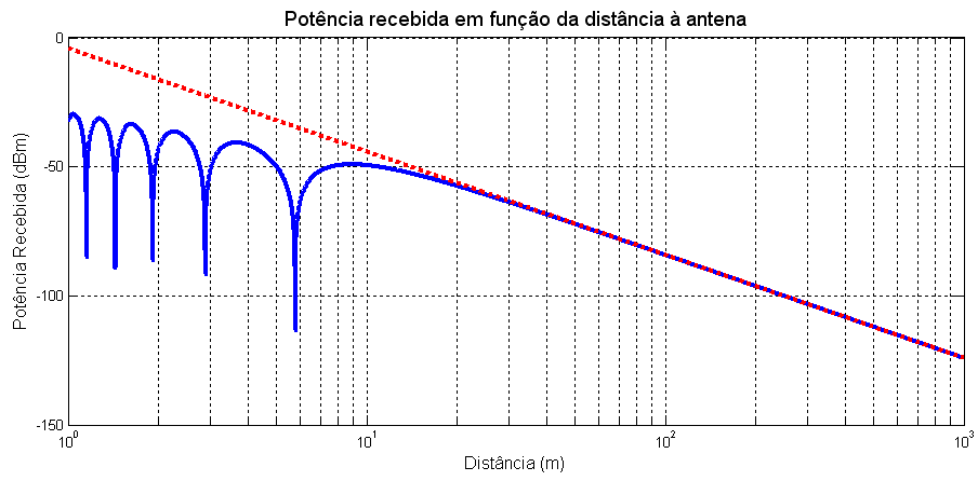


Figura 2.26 – Relação entre distância e potência recebida, modelo 2 raios.

Na figura 2.27 apresenta-se uma figura do *setup* experimental, no qual se verifica a localização de ambas as antenas da estação base e do móvel.

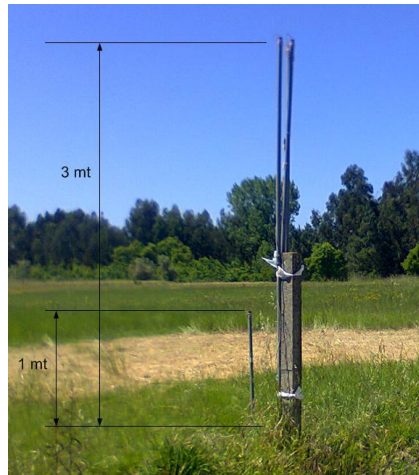


Figura 2.27 – *Setup* experimental.

Os resultados experimentais encontram-se representados na figura 2.28.

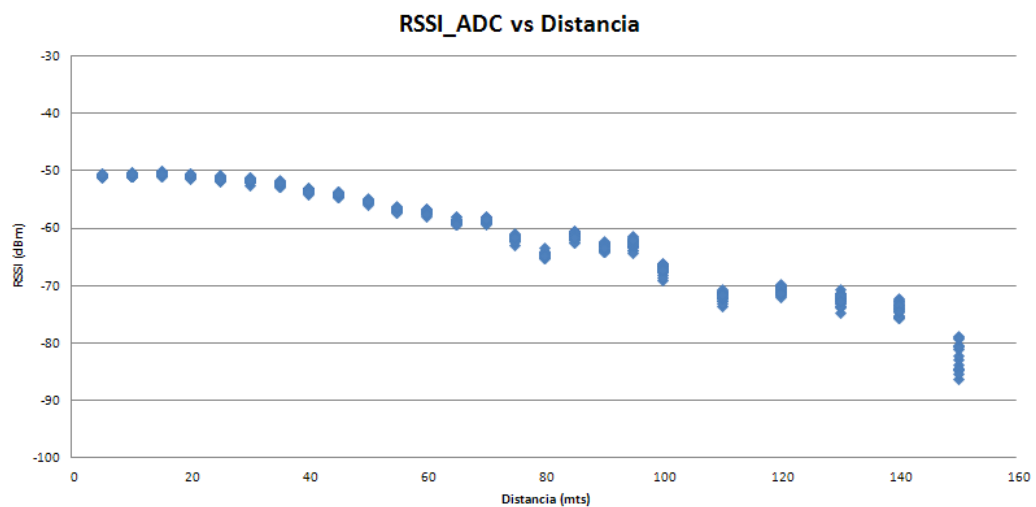


Figura 2.28 – Resultados obtidos experimentalmente por uma das estações base.

Por comparação entre o modelo teórico e o resultado obtido experimentalmente, verifica-se que efetivamente, para distância aproximadamente inferiores a vinte metros, torna-se difícil relacionar a distância em função do nível da potência do sinal recebido RSSI.

2.3.3 Modelos de desvanecimento

O sinal rádio que chega ao receptor é constituído por um sinal dominante, o qual deriva da componente em linha de vista, ao qual se sobrepõem sinais de amplitude menor correspondentes às componentes multi-percurso que indicam a existência de reflexões. No modelo mais genérico, assume-se que não existe componente dominante do sinal, que os sinais multi-percurso são aleatórios e mutuamente independentes e que todas as direcções de incidência são igualmente possíveis. Logo, considera-se que o ângulo de incidência é uniformemente distribuído e que todos sinais têm a mesma amplitude média. Assim sendo, o sinal resultante pode ser considerado como a sobreposição de um número elevado de sinais aleatórios complexos. Empregando o teorema do limite central, sabemos que a influência destrutiva do canal pode ser considerada como um processo gaussiano complexo de média nula.

As suposições subjacentes à definição da distribuição *Rayleigh* nem sempre ocorrem para os sistemas considerados. Em comunicações móveis é frequente que um dos sinais recebidos seja mais forte que os demais sinais multi-percurso. O sinal dominante é na maior parte das vezes a componente em linha de vista embora possa resultar de um sinal multi-percurso particularmente forte,

$$f_{R\Phi}(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{A_0^2 + r^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{\cos^{-1}(\varphi)}{\sigma^2}\right) \quad (16)$$

Na equação anterior σ^2 representa a variância da parte real e imaginária das componentes multi-percurso sendo a constante A_0 a amplitude do sinal da componente dominante.

$$P(r \leq r_0) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\pi \exp\left[\frac{\cos^{-1}(\varphi)}{\sigma^2}\right] d\varphi \cdot \int_0^{r_0} \frac{r}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{A_0^2 + r^2}{2\sigma^2}\right) dr \quad (17)$$

tendo em consideração que

$$I_0(z) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi \exp[z \cdot \cos^{-1}(\varphi)] d\varphi \quad (18)$$

em que $I_0(z)$ é a função de *Bessel* modificada de primeira espécie e ordem zero, resulta em

$$P(r \leq r_0) = \int_0^{r_0} \frac{r}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{A_0^2 + r^2}{2\sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{A_0 \cdot r}{\sigma^2}\right) \cdot dr \quad (19)$$

A distribuição cuja função probabilidade acumulada é definida pela equação anterior é conhecida por distribuição de *Rice* ou de *Nakagami – Rice* sendo a sua função densidade de probabilidade obtida por derivação da mesma equação

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{A_0^2 + r^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{A_0 \cdot r}{\sigma^2}\right) \quad (20)$$

Para esta distribuição é introduzido um parâmetro k , conhecido por factor de *Rice* que representa o quociente entre a potência associada ao sinal dominante, parte constante, e a potência associada aos sinais multi-percurso, parte aleatória,

$$k = \frac{\text{Potência da parte constante}}{\text{Potência da parte aleatória}} = \frac{A_0^2/2}{\sigma^2} = \frac{A_0^2}{2 \cdot \sigma^2} \quad (21)$$

Um aumento do valor de k conduz a um decréscimo na probabilidade de ocorrência de desvanecimento profundo do sinal. A distribuição de *Rice* pode ser observada na figura, para valores do factor de *Rice* k iguais a 0, 10 e 20. De notar que a situação descrita pelo valor 0 corresponde à distribuição de *Rayleigh*.

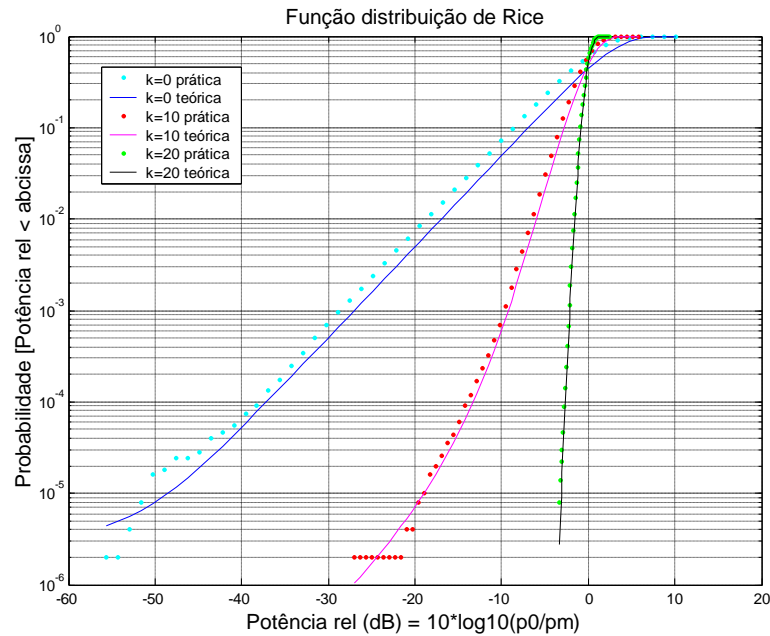


Figura 2.29 – Desvanecimento de *Rice* para $k = 0, 10$ e 20 .

2.4 Conclusão

O presente capítulo descreve os fundamentos de propagação de sinais rádio, que servirão de base para o desenvolvimento do sistema de rádio localização. Inicialmente são abordados os meios de propagação de sinais rádio, terminando o capítulo com os modelos de propagação de sinais rádio. Modelos estes, que irão permitir o estabelecimento de uma relação entre o nível de potência de sinal recebido com uma distância entre o transmissor e o receptor.

3 Técnicas de rádio localização

3.1 Sistemas de localização baseados na distância

3.1.1 Radio Signal Strenght Indicator - RSSI

O RSSI é uma métrica que define o nível de potência do sinal recebido por um receptor de rádio. Normalmente (em dispositivos de baixa potência) o seu valor é quantificado em *dBm*. De acordo com o modelo matemático de propagação de sinais rádio genérico (22), é possível relacionar o nível de potência do sinal recebido RSSI com a distância entre o transmissor e o receptor.

$$P_{RX} = P_{(0)} - 10 * \alpha * \log_{10}(d) \quad (22)$$

$$d = 10^{\frac{P_{RX} - P_{(0)}}{10 * \alpha}} \quad (23)$$

Em que:

P_{RX} – Nível da potência do sinal recebido em *dBm*.

$P_{(0)}$ – Nível da potência do sinal recebido a uma distância de um metro em *dBm*.

α – Factor de perda (2 para espaço livre e 4 para modelo terra plana).

d – Distância entre o transmissor e o receptor, expresso em metros.

O inconveniente da utilização do método da determinação da distância a partir do RSSI é que o valor do RSSI varia ao longo do tempo para a mesma posição, esta variação conhecida por desvanecimento é devida às variações da atenuação provocadas pela soma das diferentes componentes multipercurso às quais tem diferentes amplitudes e fases.

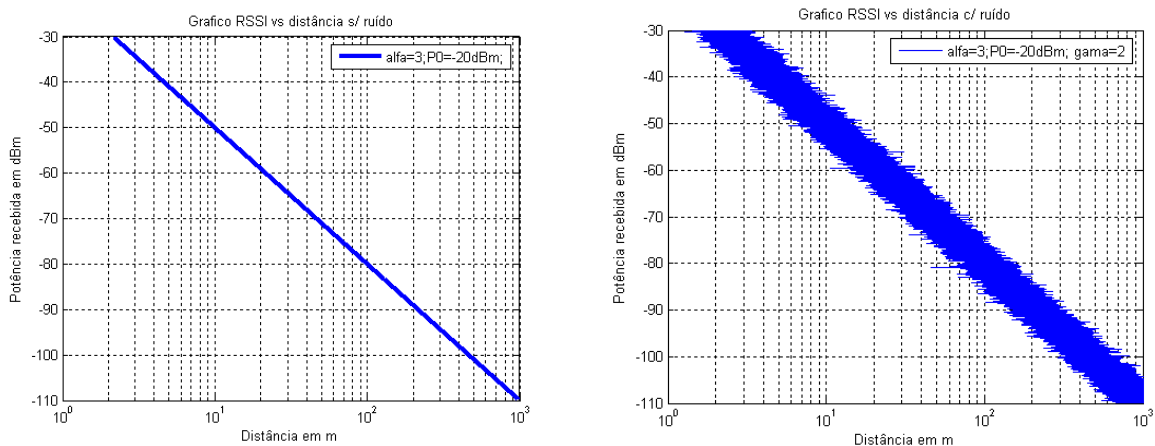


Figura 3.1 – Gráficos da distância em função do valor do RSSI, sem e com ruído.

Pelos gráficos da distância em função do valor real do RSSI, pode-se verificar o impacto das suas flutuações devidas ao desvanecimento na determinação da distância, por exemplo para o gráfico da figura 3.1 e para um nível de potência do sinal recebido de -75 dBm a sua correspondente distância pode estar compreendida entre os valores de 30 a 100 metros. Para resolver este problema utilizam-se modelos estatísticos, mais conhecidos por estimadores da localização.

Para determinar a localização de uma posição a partir do nível de potência do sinal recebido RSSI, é necessário em primeiro lugar determinar as expressões das distâncias em função do RSSI (23) para cada uma das estações de referência que constituem o sistema. Através das distâncias entre a posição a localizar e as estações de referência é possível determinar a localização da posição recorrendo a uma técnica denominada por lateração. A determinação da localização é realizada pelo cruzamento de circunferências centradas nas estações de referência tendo em conta as distâncias entre a posição a localizar e as referidas estações de referência, como se pode observar na figura 3.2.

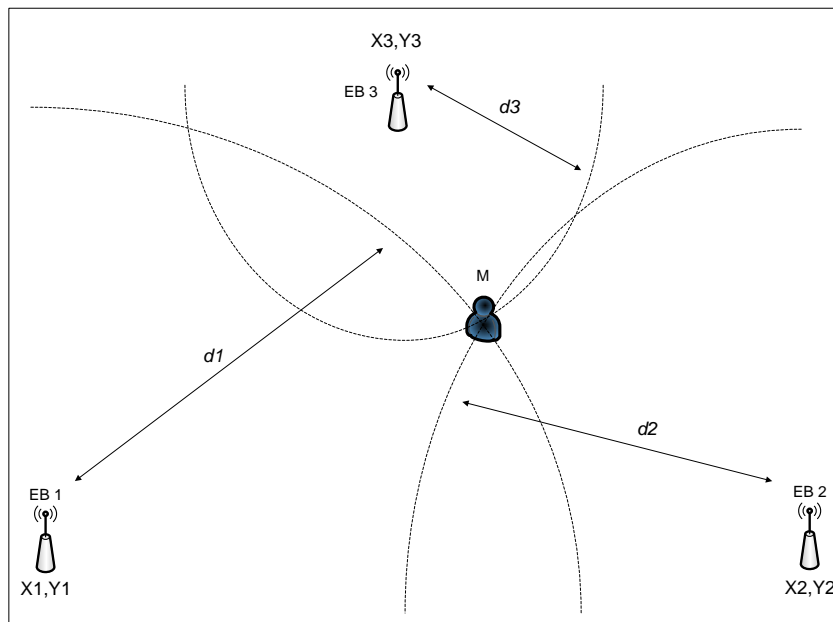


Figura 3.2 – Determinação da posição por lateração.

Para sistemas com três estações de referência, caso do exemplo presente na figura 3.2, a localização da posição do dispositivo móvel pode ser obtida através da resolução do seguinte sistema de equações lineares, em que o ponto (x, y) corresponde a localização da posição.

$$\begin{cases} d_1^2 = (X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2 \\ d_2^2 = (X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2 \\ d_3^2 = (X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2 \end{cases} \quad (24)$$

Recorrendo às operações elementares sobre linhas da matriz (subtraindo cada uma das linhas pela linha nº3, obtém-se um novo sistema de duas $(N-1)$ equações lineares.

$$\begin{cases} d_1^2 - d_3^2 = (X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2 - (X_3 - x)^2 - (Y_3 - y)^2 \\ d_2^2 - d_3^2 = (X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2 - (X_3 - x)^2 - (Y_3 - y)^2 \end{cases} \quad (25)$$

Simplificando a expressão (25), passamos a ter.

$$\begin{cases} 2 * x * (X_3 - X_1) + 2 * y * (Y_3 - Y_1) = d_1^2 - d_3^2 - X_1^2 - Y_1^2 + X_3^2 + Y_3^2 \\ 2 * x * (X_3 - X_2) + 2 * y * (Y_3 - Y_2) = d_2^2 - d_3^2 - X_2^2 - Y_2^2 + X_3^2 + Y_3^2 \end{cases} \quad (26)$$

A expressão (26) pode ser expressa na forma de matricial $A * X = B$.

$$A = \begin{bmatrix} 2 * (X_3 - X_1) & 2 * (Y_3 - Y_1) \\ 2 * (X_3 - X_2) & 2 * (Y_3 - Y_2) \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$B = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_3^2 - X_1^2 - Y_1^2 + X_3^2 + Y_3^2 \\ d_2^2 - d_3^2 - X_2^2 - Y_2^2 + X_3^2 + Y_3^2 \end{bmatrix}$$

As matrizes A e B são conhecidas, podem ser preenchidas através das coordenadas das estações de referência e pelas distâncias entre a posição a localizar e as estações de referência.

Pelo teorema da classificação dos sistemas temos.

“Se $\text{car}(A) = \text{car}(A/B) = \text{número de incógnitas}$, então o sistema é possível e determinado.”

A solução do sistema de equações lineares é obtida através da resolução da seguinte matriz.

$$X = A^{-1} * B \quad (28)$$

Para sistemas com mais de três estações de referência, a localização da posição do dispositivo móvel pode ser obtida através da resolução do seguinte sistema de equações lineares.

$$\begin{cases} d_1^2 = (X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2 \\ d_2^2 = (X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2 \\ \vdots \\ d_n^2 = (X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2 \end{cases} \quad (29)$$

Recorrendo as operações elementares sobre linhas, obtém-se o seguinte sistema de equações lineares.

$$\begin{cases} d_1^2 - d_n^2 = (X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2 - (X_n - x)^2 - (Y_n - y)^2 \\ d_2^2 - d_n^2 = (X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2 - (X_n - x)^2 - (Y_n - y)^2 \\ \vdots \\ d_{(n-1)}^2 - d_n^2 = (X_{(n-1)} - x)^2 + (Y_{(n-1)} - y)^2 - (X_n - x)^2 - (Y_n - y)^2 \end{cases} \quad (30)$$

Isolando os coeficientes, termos independentes e incógnitas, do sistema de equações lineares da expressão (30).

$$\begin{cases} 2 * x * (X_1 - X_n) + 2 * y * (Y_1 - Y_n) = d_n^2 - d_1^2 - X_n^2 - Y_n^2 + X_1^2 + Y_1^2 \\ 2 * x * (X_2 - X_n) + 2 * y * (Y_2 - Y_n) = d_n^2 - d_2^2 - X_n^2 - Y_n^2 + X_2^2 + Y_2^2 \\ \vdots \\ 2 * x * (X_{(n-1)} - X_n) + 2 * y * (Y_{(n-1)} - Y_n) = d_n^2 - d_{(n-1)}^2 - X_n^2 - Y_n^2 + X_{(n-1)}^2 + Y_{(n-1)}^2 \end{cases} \quad (31)$$

Transformando o sistema de equações lineares na forma matricial $A * X = B$.

$$A = \begin{bmatrix} 2 * (X_1 - X_n) & 2 * (Y_1 - Y_n) \\ 2 * (X_2 - X_n) & 2 * (Y_2 - Y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2 * (X_{(n-1)} - X_n) & 2 * (Y_{(n-1)} - Y_n) \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$B = \begin{bmatrix} d_n^2 - d_1^2 - X_n^2 - Y_n^2 + X_1^2 + Y_1^2 \\ d_n^2 - d_2^2 - X_n^2 - Y_n^2 + X_2^2 + Y_2^2 \\ \vdots \\ d_n^2 - d_{(n-1)}^2 - X_n^2 - Y_n^2 + X_{(n-1)}^2 + Y_{(n-1)}^2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (34)$$

Sabendo a matriz A e B, a solução pode ser obtida pela expressão (35).

$$X = [A^T * A]^{-1} * A^T * B \quad (35)$$

3.1.2 Time of Arrival (TOA)

O *Time of Arrival*, é uma técnica de localização baseada no tempo de propagação de um sinal rádio em espaço livre. Quando o transmissor envia um sinal rádio, o receptor sabe à partida o instante de tempo em que o sinal foi enviado, ao receber o sinal rádio o receptor determina o tempo de propagação do sinal rádio e através da expressão (36) é possível determinar a distância entre o transmissor e o receptor.

$$\Delta d = c * \Delta t \quad (36)$$

Em que:

Δd – Distância expressa em metros.

c – Velocidade da luz no vácuo ($\approx 3 \times 10^8$ m/s).

Δt – Tempo de propagação do sinal rádio em espaço livre, em segundos.

Para um sistema com diversas estações de referência, a determinação da localização da posição do dispositivo móvel é realizada recorrendo-se à técnica de lateração. Depois de se obter o tempo de propagação do sinal rádio entre as estações de referência e o dispositivo móvel, através da expressão (36) converte-se o tempo nas distâncias correspondentes e através da lateração circular obtêm-se a localização da posição do dispositivo móvel. Esta técnica tem o inconveniente de necessitar de sincronismo entre todas as estações de referência e dispositivos móveis.

3.1.3 Time Difference of Arrival (TDOA)

A técnica de localização *Time Difference of Arrival*, é baseada na diferença temporal na chegada de um ou vários sinais, de acordo com a literatura existente [12], [21] e [25], existem dois modelos definidos para este conceito.

Modelo baseado na propagação de sinais com diferentes velocidades de propagação.

Modelo baseado na diferença temporal na chegada de um sinal.

No primeiro modelo, a localização da posição é obtida com recurso a sinais com velocidades distintas, como por exemplo ondas electromagnéticas e ondas ultrasonicas. Quando o transmissor envia os dois sinais, o receptor recebe primeiro o sinal mais rápido no instante t_1 e espera pela recepção do sinal mais lento no instante t_2 . A diferença temporal entre os dois sinais é obtida através da expressão (37), através do sistema da expressão (39) é possível determinar a distância entre o transmissor e o receptor, em sistemas com vários receptores. Depois de obter cada uma das distâncias entre o transmissor e os receptores a localização da posição é realizada recorrendo à lateração circular das distâncias. Normalmente o primeiro sinal é designado de sinal piloto tendo como função sinalizar o início da contagem temporal, o qual poderemos considerar que $t_1 = 0$, ficando com $\Delta t = t_2$.

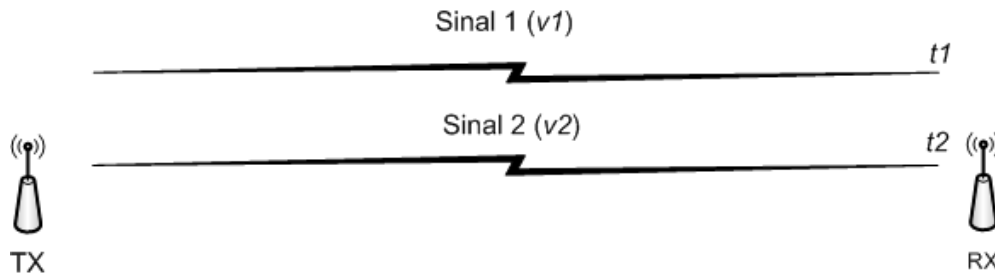


Figura 3.3 – Determinação da posição através do modelo A.

$$\Delta t = t_2 - t_1, t_2 > t_1 \quad (37)$$

$$\begin{cases} t_1 = \frac{d}{v_1} \\ t_2 = \Delta t + t_1 \\ d = v_2 * \left(\Delta t + \frac{d}{v_1} \right) \end{cases} \quad (39)$$

Simplificando a expressão (39), obtemos a expressão que define a distância entre o transmissor e o receptor em função da diferença temporal na chegada dos dois sinais expressão (40).

$$d = \frac{v_1 * v_2 * \Delta t}{(v_1 - v_2)} \quad (40)$$

No segundo modelo, a localização da posição é obtida através da diferença temporal na chegada de um sinal por vários receptores. Este modelo é baseado na lateração hiperbólica, isto é, recorre ao modelo matemático de uma hipérbole expressão (41). Na figura 3.4 representa-se o esquema subjacente à determinação da posição com base na diferença temporal na chegada do sinal.

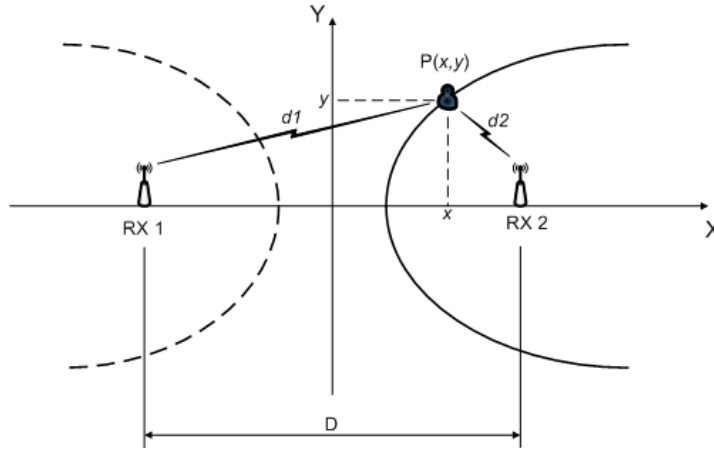


Figura 3.4 – Determinação da posição através do modelo B.

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (41)$$

Quando o transmissor envia um sinal, o receptor 1 recebe o sinal no instante de tempo t_1 e por sua vez o receptor 2 recebe o sinal no instante de tempo t_2 , a diferença temporal na chegada do sinal é definido pela expressão (42), de acordo com o modelo matemático utilizado, a diferença temporal irá corresponder a uma diferença de distâncias expressão (43), o qual poderá ser determinado através da expressão (44).

$$\Delta t = t_1 - t_2, \quad t_1 > t_2 \quad (42)$$

$$\Delta d = d_1 - d_2 \quad (43)$$

$$\Delta d = v * (t_1 - t_2) \quad (44)$$

A localização da posição do transmissor pode ser obtida através da expressão (45).

$$\begin{cases} d_1^2 = y^2 + \left(x + \frac{D}{2}\right)^2 \\ d_2^2 = y^2 + \left(\frac{D}{2} - x\right)^2 \end{cases} \quad (45)$$

A expressão (45) pode ser simplificada dando origem a expressão (46).

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{y^2 + \left(x + \frac{D}{2}\right)^2} \\ d_2 = \sqrt{y^2 + \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} \end{cases} \quad (46)$$

Recorrendo às expressões (44) e (46) obtemos a expressão (47)

$$v * (t_1 - t_2) = \sqrt{y^2 + \left(x + \frac{D}{2}\right)^2} - \sqrt{y^2 + \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} \quad (47)$$

Simplificando a expressão (47) obtemos a expressão final que define a linha onde se encontra a localização da posição em função da diferença temporal na chegada de um sinal.

$$\frac{x^2}{(v * (t_1 - t_2) / 2)^2} - \frac{y^2}{(D / 2)^2 - (c * (t_1 - t_2) / 2)^2} = 1 \quad (48)$$

A expressão (48) apenas define a linha onde se encontra o dispositivo móvel, a localização da posição do dispositivo móvel, requer pelo menos mais um receptor de referência, a lateração hiperbólica resulta da intersecção das hipérbolas (48), tal como acontece na lateração circular. Esta técnica tem o inconveniente da necessidade da sincronização de todas as estações de referência, devido a ordem de grandeza das unidades em causa.

3.1.4 Angle of Arrival (AOA)

A técnica *Angle of Arrival*, é uma técnica de localização baseada na medição do ângulo de recepção do sinal. O princípio de funcionamento é baseado na intersecção das rectas geradas pelos ângulos de recepção do sinal, visto que, os receptores têm a capacidade de determinar o ângulo de recepção do sinal e definem uma recta na direcção do ângulo, a recta pode ser definida pela expressão (49), em que o declive da mesma corresponde a tangente do ângulo detectado pela estação de referência.

$$y = a * x + b \quad (49)$$

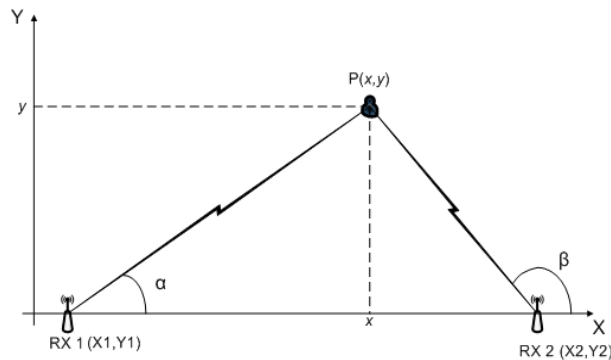


Figura 3.5 – Determinação da posição através do ângulo de chegada.

A localização da posição pode ser obtida através da resolução do seguinte sistema de equações, definida pela expressão seguinte e representada na figura 3.5.

$$\begin{cases} y = tg(\alpha) * x + Y1 - tg(\alpha) * X1 \\ y = tg(\beta) * x + Y2 - tg(\beta) * X2 \end{cases} \quad (50)$$

Esta técnica tem o inconveniente de não poder ser utilizada em cenários onde se prevê a ocorrência de múltiplas reflexões, visto que o resultado das reflexões irá introduzir erro no resultado final. Esta técnica tem contudo demonstrado ótimos resultados em cenários em que existe linha de vista geométrica entre as estações de referência e o dispositivo móvel a localizar.

3.1.5 RF Fingerprinting

A técnica de *RF Fingerprinting* é um método que consiste numa primeira fase, numa análise prévia da distribuição do nível de potência de um sinal num dado cenário. Esses valores são usados para construir um mapa designado por “Mapa de *Fingerprinting*”, que servirá posteriormente para comparação em tempo real com o nível de potência do sinal recebido. A partir de uma matriz em que se conhece a localização de cada elemento, faz-se corresponder a cada elemento da matriz o nível de potência do sinal recebido RSSI.

Na aquisição de um sinal por parte das estações de referência, para cada um dos mapas de *fingerprinting* identifica-se os elementos que correspondem aos níveis de potência de sinal recebido. Por sobreposição dos mapas é possível determinar a localização da posição do transmissor. Pela sobreposição dos mapas de *fingerprinting*, podemos verificar que apenas existe um único elemento comum em ambos os mapas, esse elemento previamente referenciado identifica a localização da posição do dispositivo móvel. É de salientar que este método é apropriado para sistemas de localização em que à partida existam reflexões e ou refrações dos sinais, devido ao facto de cada linha que representa um nível de potência do sinal recebido RSSI não ser equidistante a um ponto fixo, ponto fixo esse que representa a estação base de referência.

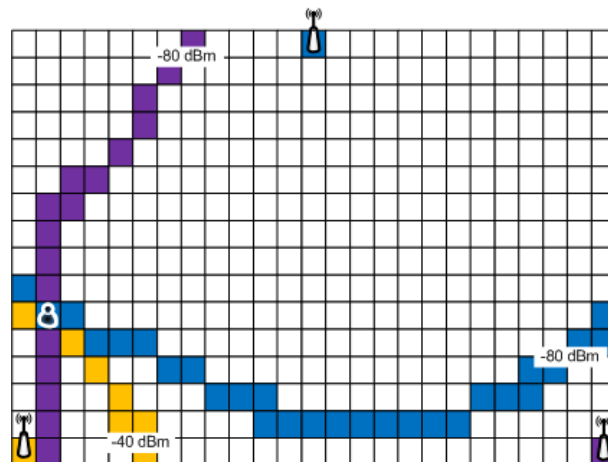


Figura 3.6 – Mapa de *Fingerprinting*.

3.2 Sistemas de localização baseados na conexão

Os sistemas de localização baseados na conexão, são sistemas cuja localização da posição do dispositivo móvel é feita através da detecção directa pela estação base de referência. Este tipo de sistemas de localização são mais simples que os sistemas baseados na distância, sendo mais indicados para cenários em que a localização exacta da posição não é muito relevante, sendo mais importante a localização do dispositivo móvel numa determinada área.

A título de exemplo nas empresas de exploração de minério o importante é saber quantos mineiros estão dentro da mina e em que túneis se encontram, sendo de menor importância o conhecimento da localização exacta dos mineiros dentro da referida mina.

Outro exemplo bastante conhecido é o sistema implementado na identificação de veículos nas auto-estradas (antigas SCUT'S), em que é evidente o interesse em saber apenas que um determinado veículo utilizou a auto-estrada para posterior cobrança de portagem.

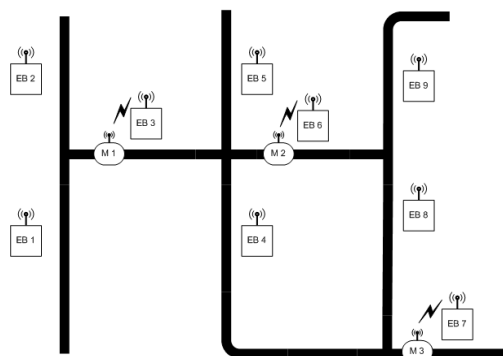


Figura 3.7 – Exemplo de um sistema de localização baseado na detecção directa.

3.3 Filtragem

3.3.1 Método de estimação de Monte Carlo

O método de estimação de **Monte Carlo**, é um método numérico para resolver problemas por meio de amostragens aleatórias. Este método tem a vantagem de necessitar apenas da função de densidade de probabilidade para descrever o modelo matemático do sistema, ao invés de complexos sistemas de equações diferenciais. Uma vez conhecido a distribuição das amostras, o método **Monte Carlo** permite obter estimativas a partir da aquisição de novas amostras, recorrendo a valores estatísticos (media, desvio padrão, fdp).

Para sistemas cuja distribuição das amostras segue uma distribuição normal, através dos parâmetros estatísticos média (μ) e desvio padrão (σ) é possível obter as funções densidade de probabilidade $p(\mathbf{x})$ e distribuição da probabilidade $P(\mathbf{x})$, recorrendo às expressões (51) e (52) e apresentadas na figura 3.8 a) e b).

$$p(x) = \frac{1}{\sigma * \sqrt{2 * \pi}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2*\sigma^2}} \quad (51)$$

$$P(x) = p(x \leq b) = \int_{-\infty}^b p(x) dx \quad (52)$$

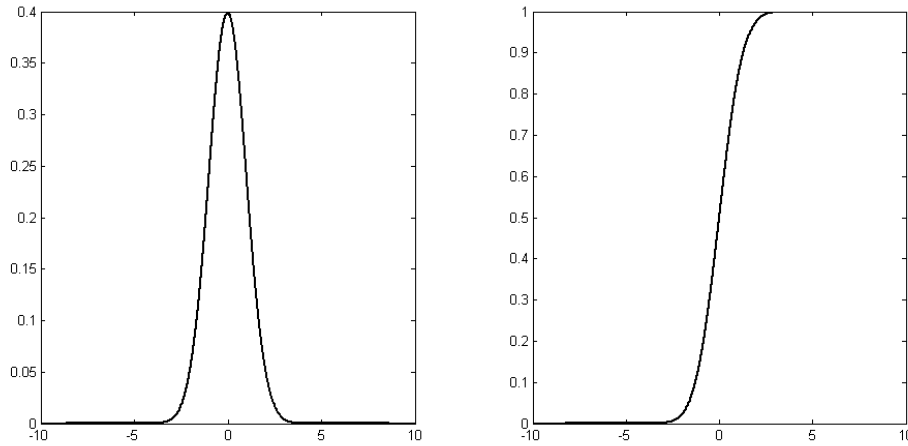


Figura 3.8 – Gráficos das funções densidade e distribuição de probabilidade.

No contexto do projeto, o objetivo é estimar a distância entre o dispositivo móvel e a estação de referência, assim sendo o método de **Monte Carlo** compreende quatro passos:

Obter o modelo matemático que define a distribuição das amostras, definindo a função densidade de probabilidade $p(x)$.

Obter amostras que correspondem à função densidade de probabilidade $p(x)$.

Pelas amostras obtidas, definir as amostras como positivas ou negativas, cada amostra será considerada positiva se o seu valor se encontrar dentro da janela de erro aceitável.

Por último com base nas amostras obtidas, verifica-se a relação do número de ocorrências de amostras positivas e o número total de amostras, obtendo-se assim a probabilidade das amostras se encontrarem dentro de um intervalo do erro definido.

Este método não irá estimar propriamente um valor final, mas sim quantificar a probabilidade do conjunto das amostras obtidas terem um determinado erro, erro esse definido à partida.

Exemplo 1 - Para exemplificar este método vou utilizar um grupo de amostras obtidas experimentalmente para uma distância de 150 metros. A variável que se pretende filtrar é o valor do $RSSI_ADC$ ¹ de cada uma das amostras obtidas.

¹ $RSSI_ADC$ é o valor obtido pelo conversor ADC de 10 bits, do microcontrolador do módulo rádio na aquisição do nível de potência do sinal recebido.

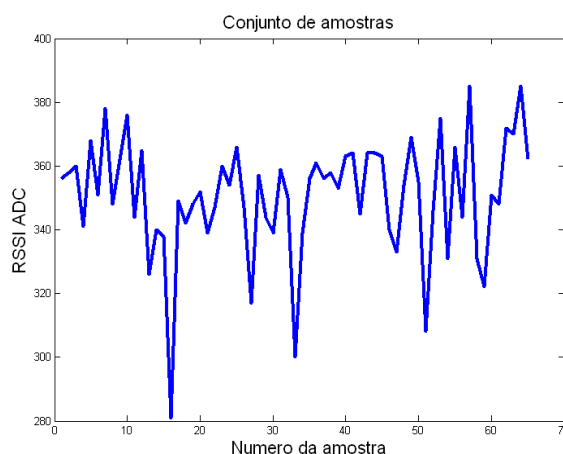


Figura 3.9 – Conjunto de amostras obtidas para a uma distância de 150 metros.

Pela análise das amostras obtidas representadas no gráfico da figura 3.9, obtém-se os seguintes parâmetros estatísticos, presentes na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amostras obtidas.

Parâmetros estatísticos	
Média	350,692
Erro-padrão	2,315
Mediana	353
Moda	356
Desvio-padrão	18,666
Variância da amostra	348,435
Curtose	2,704
Assimetria	-1,160
Intervalo	104
Mínimo	281
Máximo	385
Soma	22795
Contagem	65

Recorrendo à expressão (53) podemos filtrar as amostras de modo a que sejam consideradas como válidas as amostras que correspondem a 20% das amostras com maior peso. Utilizando a expressão da função densidade de probabilidade de uma distribuição normal, com o valor da média e do desvio padrão anteriormente calculados obtém-se a expressão (54).

$$P(x) = p(a \leq x \leq b) = \int_a^b p(x) dx \quad (53)$$

$$p(x) = \frac{1}{18,67 * \sqrt{2 * \pi}} * e^{-\frac{(x-351)^2}{2*18,67^2}} \quad (54)$$

Pretende-se agora determinar o intervalo onde se situam 20% das amostras com maior peso centradas no valor médio.

$$0,1 = p(a \leq x \leq 351) = \int_a^{351} \frac{1}{18,67 * \sqrt{2 * \pi}} * e^{-\frac{(x-351)^2}{2*18,67^2}} dx \quad (55)$$

$$a = 346 \quad (56)$$

$$b = 351 + (351 - a) = 356 \quad (57)$$

A figura 3.10 apresenta a sombreado a localização do conjunto com essas características.

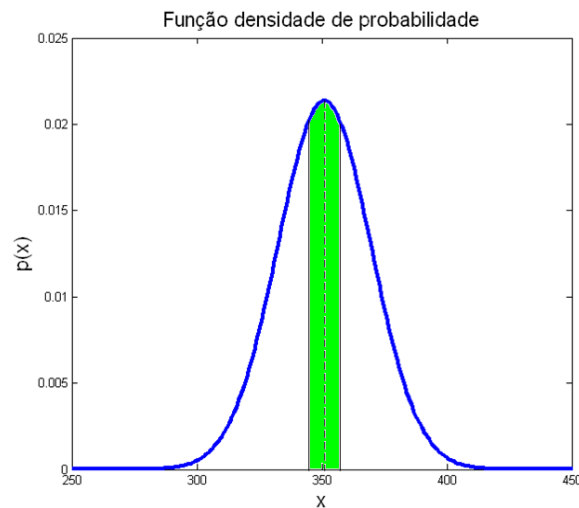


Figura 3.10 – Gráfico da função densidade de probabilidade.

Por sua vez a figura 3.11 apresenta o mesmo intervalo mas agora sobre a função distribuição de probabilidade.

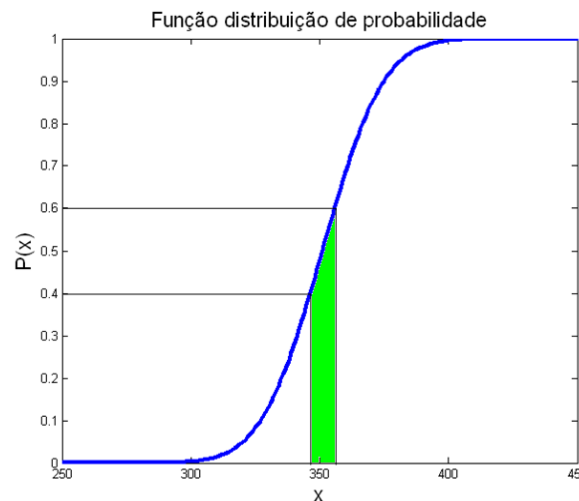


Figura 3.11 – Gráfico da função distribuição de probabilidade.

Dos gráficos anteriores verifica-se que para uma janela de amostras recebidas, todas as amostras cujo valor do RSSI_ADC se encontre entre 346 e 356, correspondem a 20% das amostras com maior peso, considerando essas amostras como válidas e rejeitando as inválidas, obtemos o gráfico seguinte que mostra o resultado da filtragem pelo método **Monte Carlo**.

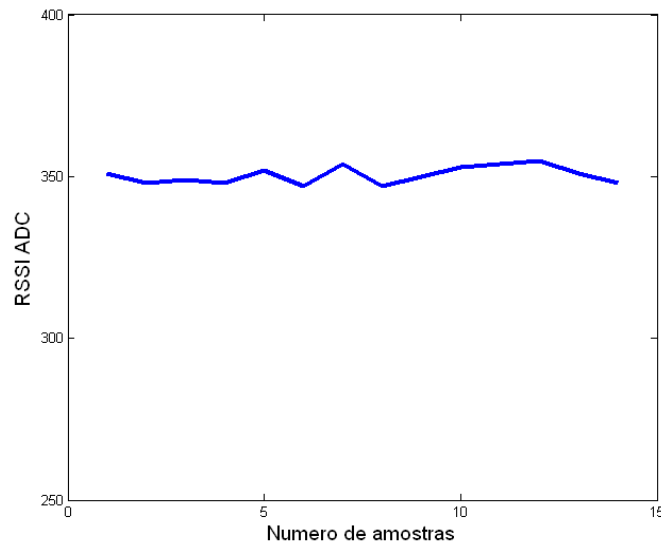


Figura 3.12 – Resultado da filtragem usando o método **Monte Carlo**.

Pelo gráfico da figura 3.12, pode-se verificar que a frequência relativa expressão (58) do conjunto de amostras validas é cerca de 23%, isto quer dizer que, em 100 amostras obtidas, 23 amostras são válidas. Da expressão (60) podemos verificar que a probabilidade de uma amostra válida corresponder a 150 metros é de 98,6%.

$$f_r = \frac{\text{Número de amostras válidas}}{\text{Número total de amostras obtidas}} \quad (58)$$

$$f_r = \frac{15}{65} = 0.23 \quad (59)$$

$$q(x) = \frac{\text{Limite inferior da janela de amostras}}{\text{Média}} \quad (60)$$

$$q(x) = \frac{346}{351} \approx 98,6\% \quad (61)$$

3.3.2 Filtro de partículas

O filtro de partículas é um filtro baseado na implementação não paramétrica da estimação *Bayesiana*, cujo objectivo é estimar uma variável ao longo do tempo com recurso a uma função densidade de probabilidade [64]. Este método tem como princípio de funcionamento, representar através de uma função densidade de probabilidade o comportamento de um conjunto de partículas, na aquisição de uma nova amostra é lhe associado um conjunto de partículas e com o passar do tempo, o conjunto de partículas é modificado de acordo com a soma ponderada de todo o conjunto de partículas, convergindo assim todas as partículas para um único ponto, como se pode observar na figura 3.13.

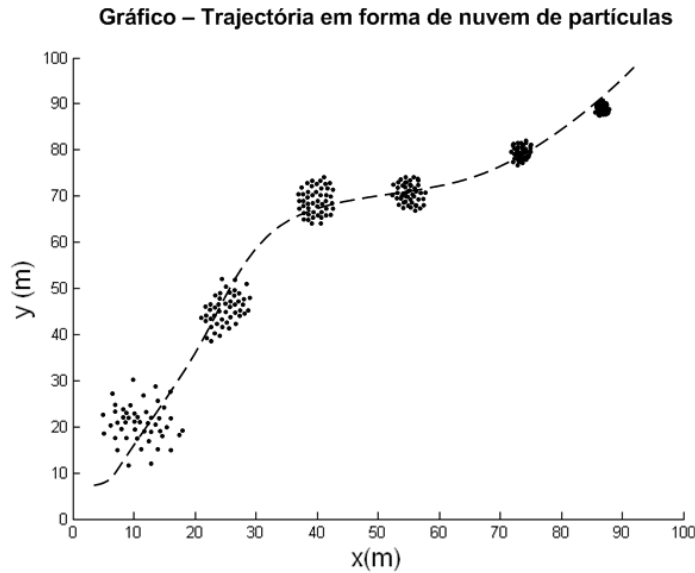


Figura 3.13 – Trajectória representada por uma nuvem de partículas.

O método propõe um processo de estimação sequencial composto por duas etapas [19], [29], [43], [49], [64], [66], [68], [70], [74] e [79]:

Etapa 1 – Predição.

Etapa 2 – Actualização.

Numa primeira etapa, a predição consiste em definir o modelo matemático a partir da lei da probabilidade total expressão (62) de modo a representar a distribuição das amostras.

$$p(x_t) = \sum_{t=1}^N p(x_t|x_{t-1}) * p(x_{t-1}) \quad (62)$$

Recorrendo a estimação recursiva *Bayesiana*, podemos definir o modelo do sistema expressão (63), o modelo de medida expressão (64) e o modelo de avaliação da informação expressão (65).

$$x_t = f_t(x_{t-1}, w_t) \leftrightarrow p(x_t|x_{t-1}) \quad (63)$$

$$y_t = h_t(x_t, v_t) \leftrightarrow p(y_t|x_t) \quad (64)$$

$$D_t = (y_1, y_2, \dots, y_t) \leftrightarrow p(x_0) \quad (65)$$

Em que w_t e v_t representam o ruído aleatório que é adicionado às amostras. O modelo matemático da predição pode ser obtido pela probabilidade da estimativa da próxima amostra condicionada pelo peso da amostra actual, pela expressão (66).

$$p(x_{t+i}|D_t) \quad (66)$$

A expressão (66) pode ser transformada de modo a ser obtido a probabilidade da amostra actual condicionada pelo peso da amostra anterior expressão (67).

$$p(x_t|D_{t-1}) \quad (67)$$

Pelas expressões (62) e (67) obtemos a predição da distribuição das amostras expressão (68).

$$p(x_t|D_{t-1}) = \sum_{t=1}^N p(x_t | x_{t-1}) * p(x_{t-1}|D_{t-1}) \quad (68)$$

Na sua forma final obtém-se a probabilidade da amostra actual condicionada pela amostra sendo o peso no instante anterior obtido pela expressão (69).

$$p(x_t, x_{t-1}|D_{t-1}) = p(x_t|x_{t-1}) * p(x_{t-1}|D_{t-1}) \quad (69)$$

Na segunda etapa, a actualização consiste em utilizar a chegada de novas amostras para actualizar a predição, estimando assim a localização da nova posição. A actualização é feita recorrendo à regra de *Bayes*, expressão (70), em que se pretende determinar a probabilidade da estimativa actual condicionada pelo peso da amostra actual, expressão (71).

$$p(x_t|z_t) = \frac{p(z_t|x_t)*p(x_t)}{p(z_t)} \quad (70)$$

$$p(x_t|D_t) = \frac{p(y_t|x_t)*p(x_t|D_{t-1})}{p(y_t|D_{t-1})} \quad (71)$$

Simplificando a expressão (71) obtemos na forma final a probabilidade da medida actual condicionada pela amostra actual e pelo peso da amostra anterior expressão (72).

$$p(y_t, x_t|D_{t-1}) = p(y_t|x_t) * p(x_t|D_{t-1}) \quad (72)$$

A partir dos modelos definidos para a predição expressão (69) e actualização expressão (71), e tendo em consideração o ruído que é adicionado em cada amostra expressões (63) e (64), o passo seguinte consiste na definição da probabilidade *a posteriori* do estado do sistema expressão (73).

$$Bel(x_t) = p(x_t | y_1, \dots, y_t) \quad (73)$$

Em que:

x_t – Estado dinâmico do sistema.

y_1, \dots, y_t – Conjunto de amostras obtidas.

Exemplo 2 - Para exemplificar a aplicação do filtro de partículas irei utilizar o mesmo grupo de amostras obtidas experimentalmente o qual foi utilizado no exemplo 1. O objectivo deste exemplo consiste em implementar o filtro de partículas, de modo a verificar e avaliar o seu resultado. Para o efeito serão analisados neste exemplo dois cenários, no primeiro cenário apenas será filtrada uma única amostra, no segundo cenário serão filtrados todas as amostras, que neste caso correspondem ao valor do RSSI_ADC para uma distância de 150 metros, pretendendo-se assim verificar o comportamento do filtro de partículas, para diferentes amostras mas cujo resultado se estime que seja o mesmo.

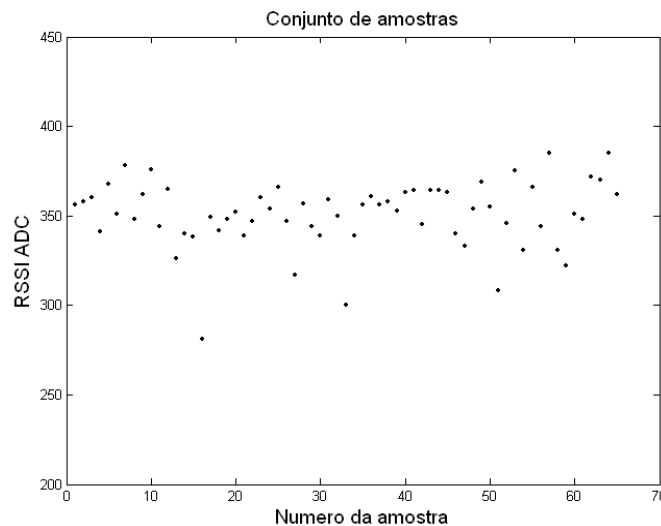


Figura 3.14 – Conjunto de amostras obtidas para a uma distância de 150 metros.

Pela análise das amostras obtidas, obtém-se os parâmetros estatísticos, presentes na tabela 3.1, os quais se referem aos parâmetros estatísticos do exemplo 1.

Cenário 1 – Filtragem de uma única amostra.

O primeiro passo será definir os modelos do sistema expressão (74) e de medida expressão (75).

$$x_t = \text{Média} + w_t \quad (74)$$

$$y_t = \frac{x_t^2}{3500} + v_t \quad (75)$$

No segundo passo, definimos o número de partículas (no exemplo foram escolhidas 100 partículas) e introduz-se a nuvem de partículas à amostra obtida, como se ilustra na figura seguinte.

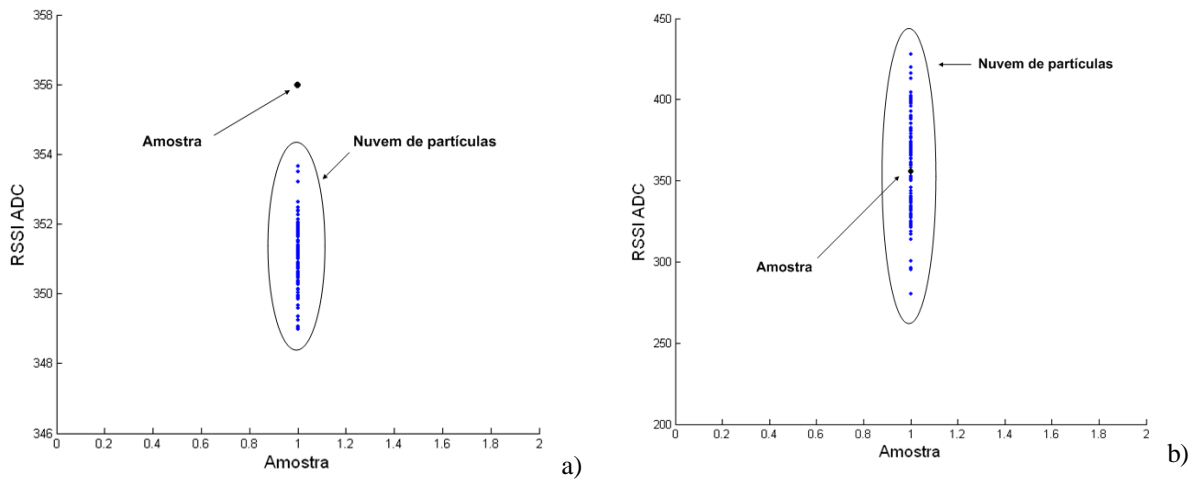


Figura 3.15 – Representação gráfica da nuvem de partículas a) e resultado da filtragem b).

Para cada uma das partículas, após a actualização expressão (75), determina-se a sua densidade de probabilidade através da expressão (51), terminando o processo com a normalização do somatório das densidades de probabilidade de todas as partículas e a reamostragem das partículas. A figura b) ilustra o resultado final da filtragem pelo método do filtro de partículas, no qual pode-se verificar claramente a concentração das partículas na zona cujo RSSI_ADC é cerca de 351, o valor final pode ser obtido pela média aritmética de todas as partículas, que neste caso é 351.

Cenário 2 – Filtragem sequencial de um conjunto de amostras.

Neste cenário pretende-se verificar o comportamento do filtro de partículas para um conjunto de amostras, o processo de filtragem será idêntico ao implementado no cenário 1, com a diferença de que todas as amostras serem filtradas de acordo com a sua chegada, de modo sequencial. A figura seguinte ilustra a nuvem de partículas associada a cada uma das amostras.

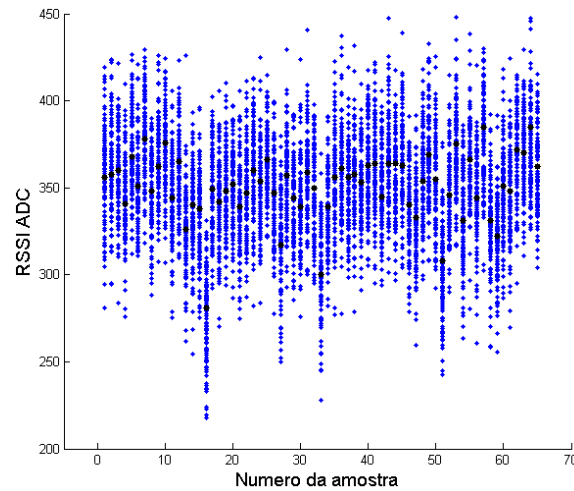


Figura 3.16 – Representação gráfica da nuvem de partículas associada as amostra obtidas.

A figura 3.17 ilustra o resultado final do processo de filtragem, dos resultados obtidos verifica-se que o resultado final é praticamente uma linha, de acordo com o que era esperado.

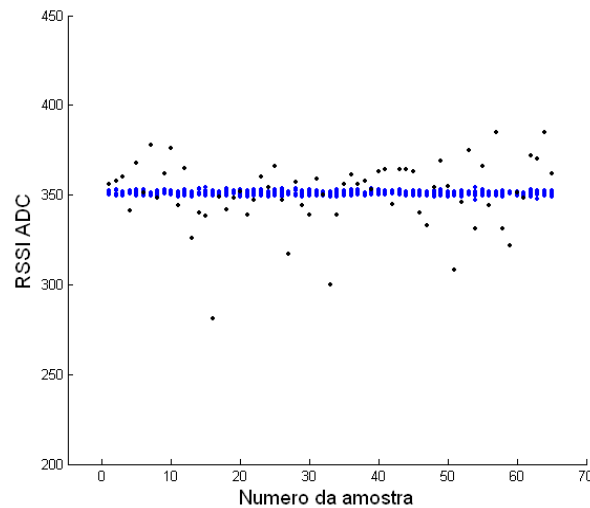


Figura 3.17 – Resultado da filtragem para o conjunto das amostras obtidas.

A figura 3.18 ilustra o fluxograma do algoritmo utilizado para implementar o filtro de partículas. Inicialmente é definido o número de partículas e o número de iterações. Quando uma nova amostra é recebida, é adicionada à mesma a nuvem de partículas, sendo iniciado o processo de filtragem. Para cada iteração, recorrendo às expressões (74) e (75) cada partícula é actualizada sendo determinada a sua densidade de probabilidade. Terminado este processo com a actualização da função distribuição de probabilidade normalizado, que será utilizada para a re-amostragem das partículas na próxima iteração.

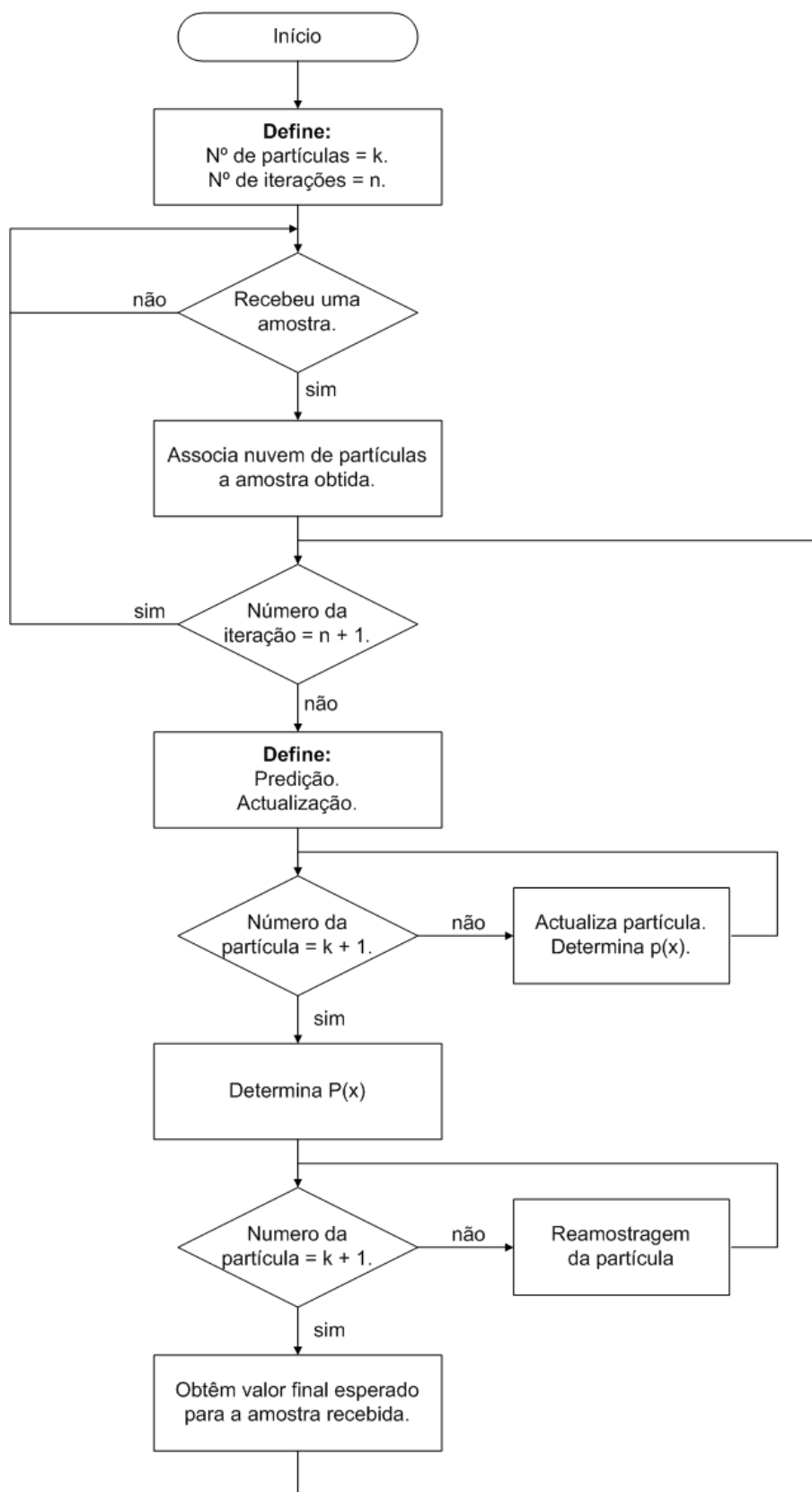


Figura 3.18 – Fluxograma do algoritmo implementado.

Exemplo 3 - Neste exemplo pretende-se verificar o comportamento do filtro de partículas para um sistema dinâmico, para o efeito será utilizado um grupo de amostras obtidas experimentalmente, em que o dispositivo móvel se movimenta num percurso de 150 metros.

Para se obter o modelo do sistema é necessário definir a função que melhor se aproxime à representação do valor do RSSI_ADC em função da distância, para o efeito recorreu-se a um polinómio de segundo grau expressão (76).

$$RSSI_{ADC} = -0.006 * Distância^2 - 0.937 * Distância + 568.9 \quad (76)$$

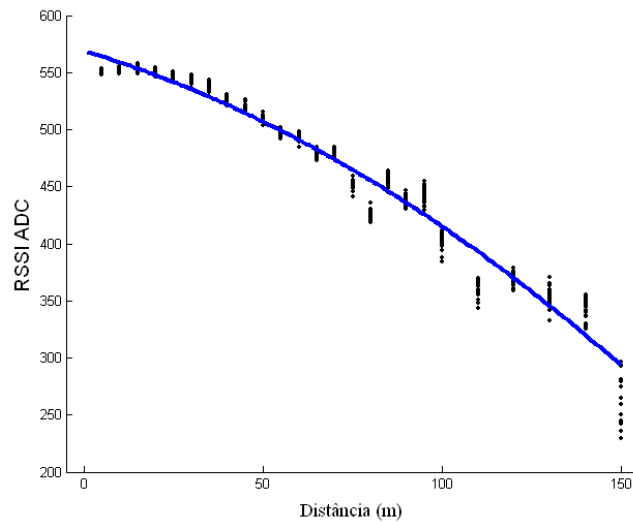


Figura 3.19 – Gráfico da função que melhor se aproxima a representação das amostras.

O modelo do sistema pode ser obtido invertendo a expressão (76), passando assim a ser possível representar a distância em função do valor do RSSI_ADC expressão (77).

$$Distância = 12.91 * (\sqrt{605 - RSSI_{ADC}} - 6.05) \quad (77)$$

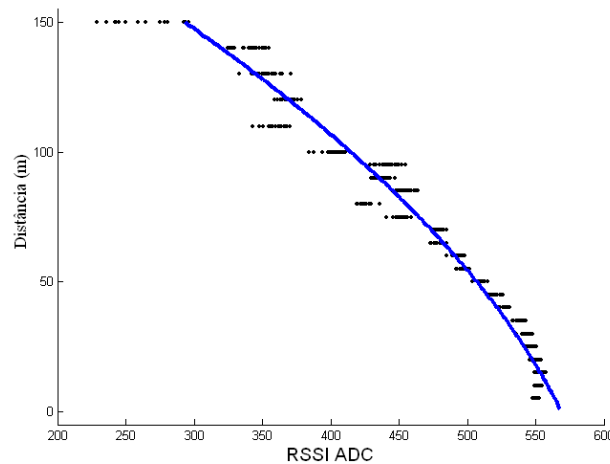


Figura 3.20 – Representação gráfica da função do modelo do sistema.

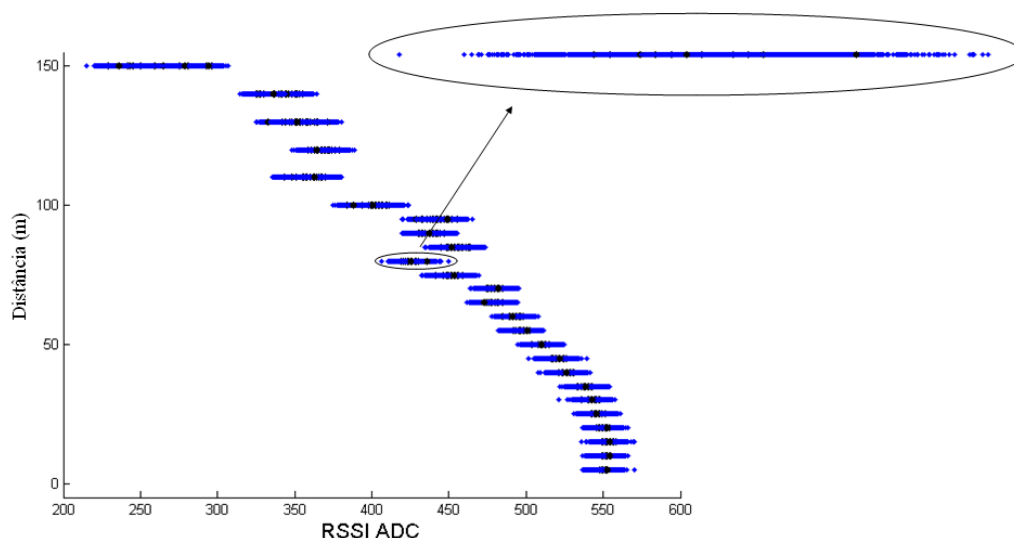


Figura 3.21 – Representação gráfica da nuvem de partículas associada a cada amostra.

Pela análise do gráfico da figura 3.22, pode-se verificar que o resultado da filtragem das amostras obtidas pelo método filtro de partículas corresponde de um certo modo ao resultado pretendido. É de salientar a importância na definição do modelo do sistema expressão (77), que deve ser o mais próximo possível da representação das amostras obtidas. Para o efeito deve-se previamente efectuar um conjunto de medidas de modo a obter-se uma previsão da distribuição das amostras.

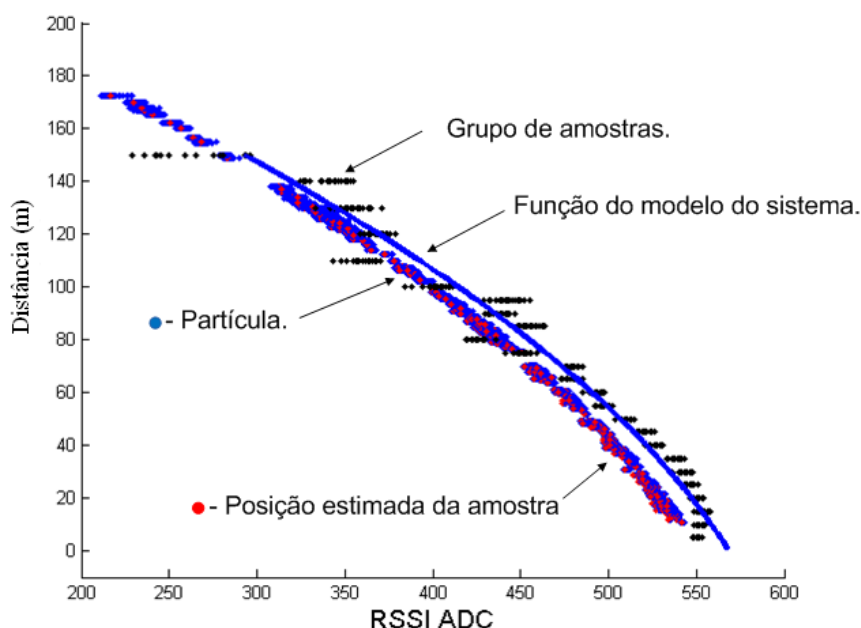


Figura 3.22 – Resultado final da filtragem pelo método filtro de partículas.

Da figura 3.23, que representa a relação entre a distância real e a distância estimada, para o conjunto de amostras obtidas (676 amostras) podemos verificar pela análise dos valores de erro expressão (78), que o erro médio expressão (79) é de 4.70 metros e o erro máximo absoluto é de 21 metros.

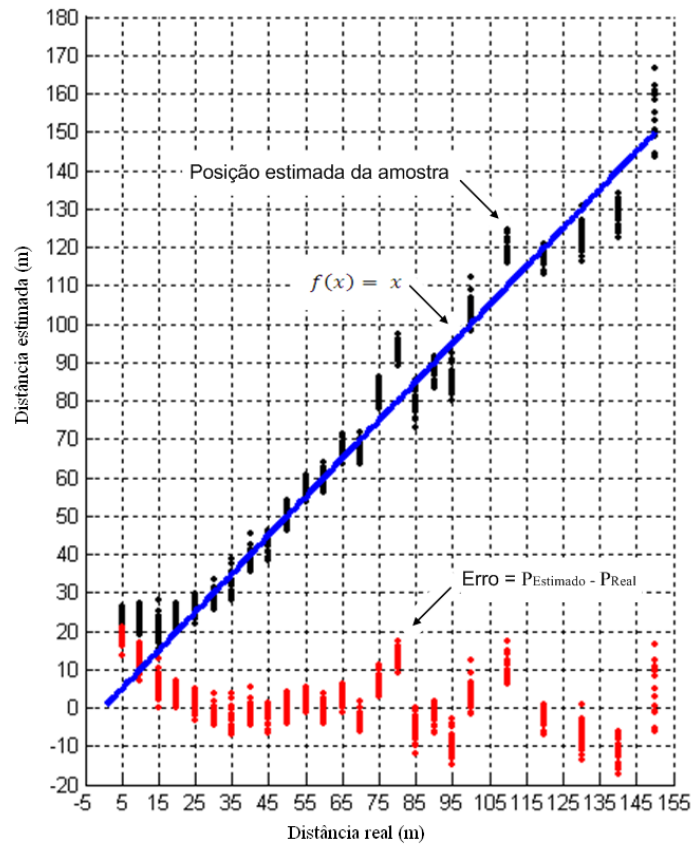


Figura 3.23 – Gráfico da relação entre distância real e estimada.

$$Erro = P_{Estimado} - P_{real} \quad (78)$$

$$Erro_{Medio} = \frac{\sum Erro}{\text{Numero total de amostras}} \quad (79)$$

A figura 3.24 mostra a distribuição do erro para o conjunto de amostras obtidas, na forma de um histograma.

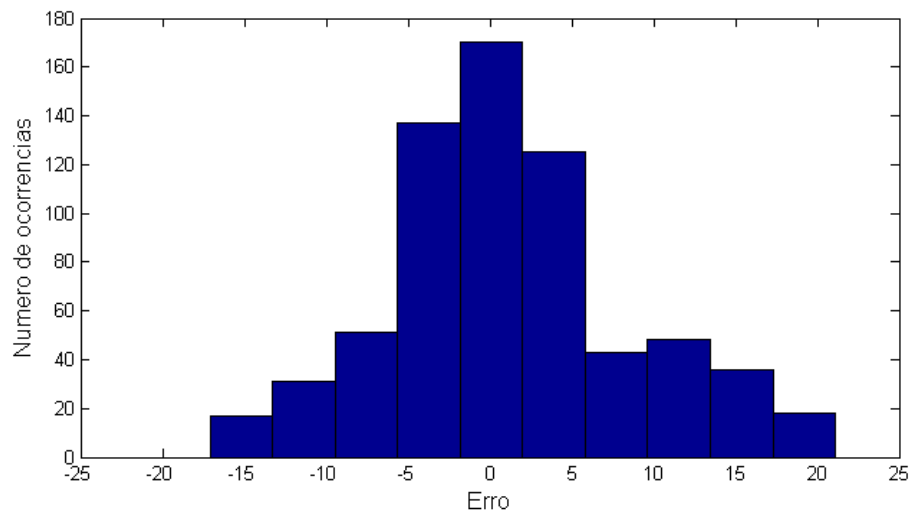


Figura 3.24 – Histograma da distribuição do erro.

3.4 Conclusão

O presente capítulo, descreve as técnicas de localização e métodos de filtragem que podem melhorar o desempenho de um sistema de localização. Pelas técnicas de localização abordadas, chega-se a conclusão que a mais indicada para o presente projecto, é a técnica que relaciona um nível de potência do sinal recebido com uma distância, juntamente com a lateração circular. Quanto à filtragem, fica-se unicamente a saber que o desempenho do sistema de localização, pode ser bastante melhorado com o recurso de filtros.

4 Sistema de rádio localização proposto

4.1 Introdução

O sistema de rádio localização proposto, pretende determinar a localização de um dispositivo móvel a partir das técnicas de localização apresentadas anteriormente baseadas no tempo de propagação do sinal no espaço e na medição do nível de potência do sinal recebido RSSI. O uso destas duas técnicas em simultâneo tem como objectivo melhorar a precisão do resultado final. Para o efeito pretende-se implementar um sistema rádio constituído por dispositivos móveis e por estações base, conforme se representa na figura seguinte.

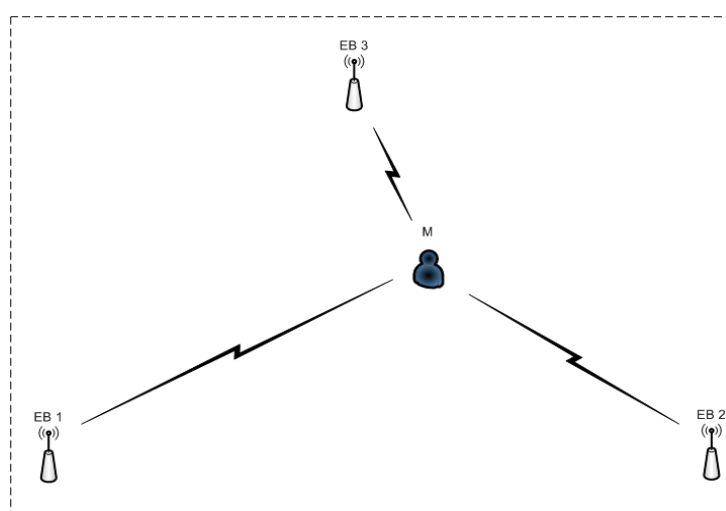


Figura 4.1 – *Layout* do sistema rádio localização a implementar.

O sistema de rádio localização a implementar deve ter a capacidade, de em tempo real monitorizar a localização das posições actuais dos dispositivos móveis, monitorizando a trajectória dos mesmos. Adicionalmente podem ser incluídas no sistema, outras potencialidades como por exemplo a capacidade de gerar alarmes no caso de um dispositivo móvel se encontrar fora de uma área predefinida.

O sistema implementado, no presente trabalho será constituído por:

- Três estações base¹;
- Dois dispositivos móveis;
- *Software* de monitorização do sistema de rádio localização.

¹ em que duas das estações base têm a função de estações repetidoras, isto é, ao receberem o sinal dos dispositivos móveis adicionam ao sinal o valor da potência do sinal recebido RSSI e o tempo de propagação do sinal e reenviam para a estação base principal, que por sua vez a estação base principal reenvia para a unidade central de gestão e processamento de dados.

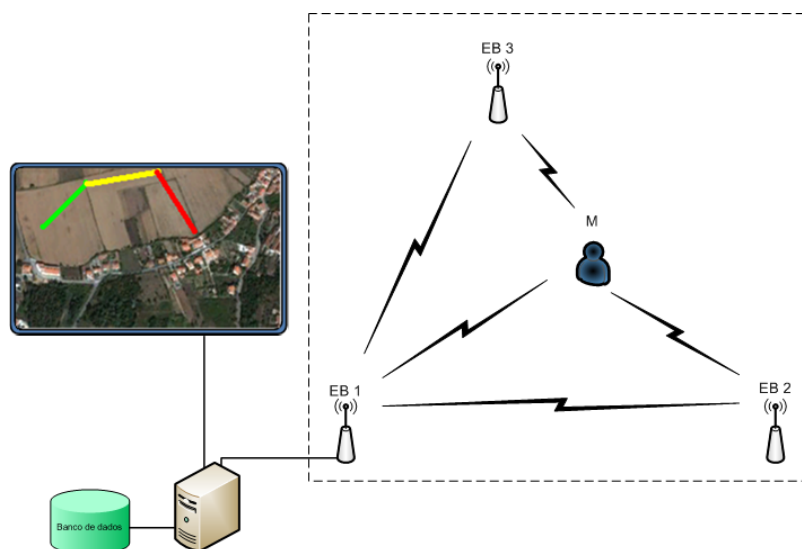


Figura 4.2 – Elementos do sistema rádio localização a implementar.

No capítulo 3, foram apresentados e analisadas as técnicas de rádio localização que melhor se enquadram no projecto em questão. O desenvolvimento do sistema, teve por base um conjunto de requisitos de *hardware* que compreendia a utilização de conjunto de estações base, não superior a 4, e dispositivos móveis de baixo consumo e energeticamente autónomos por um período superior a 3 anos.

A partir dos requisitos funcionais mencionados, tornou-se evidente a complexidade do projecto a desenvolver. Dois dos desafios mais importantes compreendem a autonomia energética dos dispositivos móveis e o acesso à rede de estações de referência por parte dos dispositivos móveis.

Para ultrapassar estes dois desafios em simultâneo foi analisada uma técnica, que consiste em manter os dispositivos móveis no modo de baixo consumo durante o intervalo de tempo em que não se encontrem activos. Este método irá permitir aumentar a autonomia energética dos dispositivos móveis em cerca de 2000 vezes, para ultrapassar o outro desafio recorreu-se a técnica de acesso ao meio, por divisão do tempo e a divisão da banda ISM dos 433 MHz em diversos canais, utilizados pelas diferentes estações de referência.

4.1.1 Topologias e protocolos de rádio localização

Inicialmente foi analisado um sistema baseado no protocolo de comunicação *Master/Slave*, em que periodicamente e de modo sequencial as estações base questionavam os dispositivos moveis. O princípio de funcionamento é bastante simples, cada uma das estações base efectua uma ligação com um dispositivo móvel e na resposta mede o nível de potência do sinal recebido e o tempo de propagação do sinal. Este processo é repetido de modo sequencial por todas as estações base envolvidas no sistema. Este método acabou por ser abandonado pois implicava que os dispositivos móveis se encontrassem sempre activos, no entanto como vantagem eliminava os conflitos de acesso ao meio.

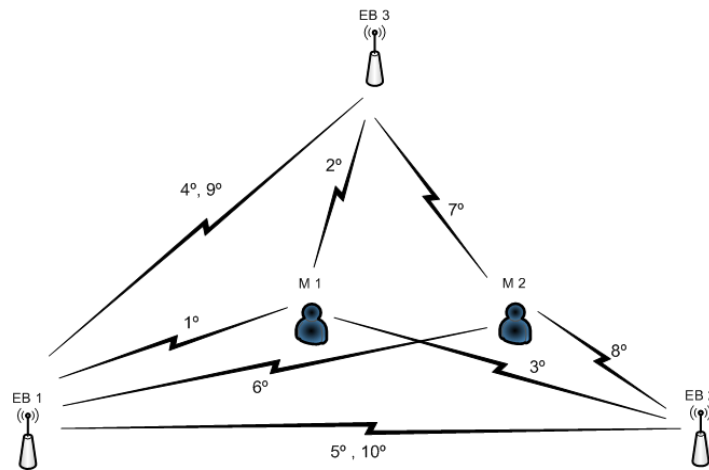


Figura 4.3 – Sistema baseado no protocolo *Master/Slave*.

Outro dos métodos propostos é baseado em faróis e encontra-se representado na figura 4.4. Este método tem como princípio de funcionamento o envio sequencial de uma mensagem por parte das estações base para todos os dispositivos móveis. Neste método cada dispositivo móvel guarda o nível de potência de sinal recebido RSSI de cada uma das estações base. No final do processo e de um modo sequencial cada dispositivo móvel envia uma mensagem cuja informação contém conteúdo níveis de potência do sinal recebido RSSI de cada uma das estações base. Este método também acabou por ser abandonado pois implicava que os dispositivos móveis se encontrassem sempre activos e exigia técnicas de acesso ao meio mais complexas.

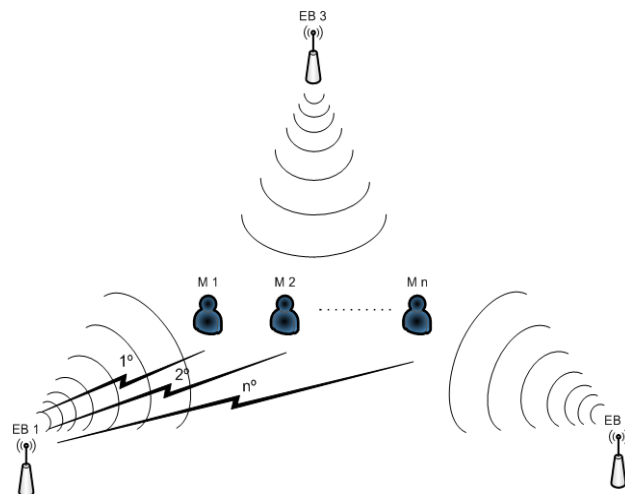


Figura 4.4 – Sistema baseado no método dos faróis.

Por último, e de modo a ultrapassar as limitações enunciadas, desenvolveu-se um sistema o qual irei chamar “*wake up system*”, devido ao facto dos dispositivos móveis no seu estado normal se encontrarem adormecidos (modo de baixo consumo). Periodicamente cada dispositivo móvel acorda e inicia o processo de medição do nível de potência do sinal recebido RSSI e do tempo de propagação do sinal no espaço entre a estação base de referência e o dispositivo móvel, terminando o processo com o regresso ao estado adormecido.

Para implementar este sistema foi necessário atribuir a cada dispositivo móvel um intervalo de tempo específico de ocupação do canal rádio. Para obter o nível de potência do sinal recebido RSSI e o tempo de propagação do sinal, foi desenvolvido um protocolo de comunicações entre os dispositivos móveis e as estações base. O princípio de funcionamento deste sistema consiste em colocar um dispositivo móvel no estado normal de funcionamento ao fim de um dado período de tempo. Nesse estado o dispositivo móvel envia uma mensagem a todas as estações base a indicar que se encontra disponível para iniciar o processo de localização. Ao iniciar o processo de localização, cada uma das estações base sequencialmente comunica com o dispositivo móvel de forma a obter da parte deste o nível de potência de sinal recebido RSSI e o tempo de propagação do sinal.

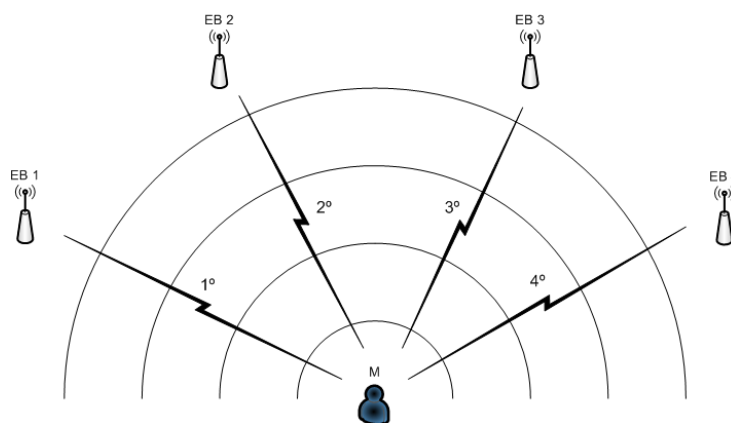


Figura 4.5 – Sistema baseado no método “Wake Up”.

4.2 Plataforma de hardware desenvolvida

A plataforma de *hardware* desenvolvida para o sistema de rádio localização, é constituída por um microcontrolador e um *transceiver* rádio. Para o efeito foi escolhido o microcontrolador PIC18F26K22 do fabricante Microchip Technology Inc. A escolha deste modelo deve-se a dois factores, primeiro o facto deste microcontrolador operar a uma frequência de 64 MHz, o que permitirá fazer contagens temporais com passos de 16 ns, este ponto é importante no sentido de teoricamente ser possível medir o tempo de propagação do sinal rádio entre um transmissor e um receptor, com uma resolução de cerca de 5 metros. O segundo factor deve-se ao facto de ser um microcontrolador de baixo consumo, no modo adormecido consome cerca de 350 nA.

O microcontrolador PIC18F26K22, apresenta o *pinout* da figura 4.6 e possui as seguintes características:

- 64 Kbytes de memória FLASH para programa;
- 3896 Bytes de memória RAM;
- 1024 bytes de memória EEPROM;
- Pode operar a uma frequência de 64 MHz, com recurso a uma *PLL*;
- Possui um temporizador, com fonte de relógio ligado ao relógio do sistema F_{OSC} .

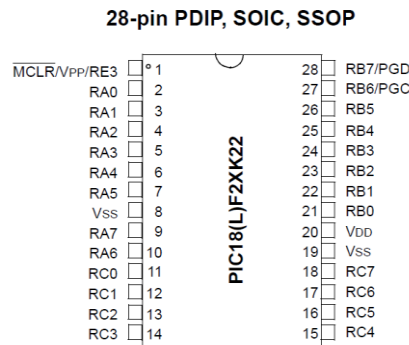


Figura 4.6 – Pinout do microcontrolador PIC18F26K22 [82].

O *transceiver* rádio escolhido para o projecto foi o modelo MRF49XA, também do fabricante *Microchip Technology Inc.* A escolha deste modelo deve-se, de certo modo, ao suporte técnico fornecido pelo fabricante. Como principais características posso referir as seguintes:

- Comunica com o microcontrolador por SPI a uma taxa de 1 Mbit;
- No modo adormecido consome 300 nA;
- No modo de transmissão consome cerca de 15 mA;
- Pode operar nas bandas 433, 868 e 915 MHz;
- A técnica de modulação é FSK, com capacidade de utilizar FHSS;
- Indicado para aplicações de curta distância, cerca de 250 metros;
- O receptor possui uma sensibilidade de -110 dBm;
- O transmissor possui uma potência máxima de 7 dBm;
- Possui uma saída analógica correspondente ao RSSI;
- Possui um registo digital correspondente ao RSSI;
- Possui um registo digital com a indicação da qualidade dos dados recebidos;
- Possui a capacidade de controlar a potência do transmissor;
- Possui a capacidade de controlar a sensibilidade do receptor.

A figura 4.7 representa o *pinout* do *transceiver* rádio MRF49XA.

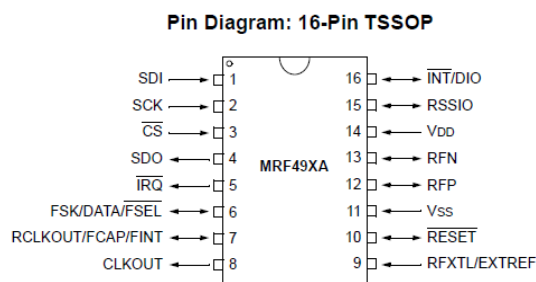


Figura 4.7 – Pinout do *transceiver* rádio MRF49XA [83].

Um dos factores que também contribuiu para a escolha do *transceiver* rádio MRF49XA, foi o facto de este possuir uma saída analógica, cujo valor corresponde a um valor de potência do sinal rádio recebido. A figura seguinte ilustra a relação entre o valor da potência de entrada do sinal RF, expressa em dBm, com o valor da tensão de saída analógica expressa em volt, de acordo com o *datasheet* do fabricante.

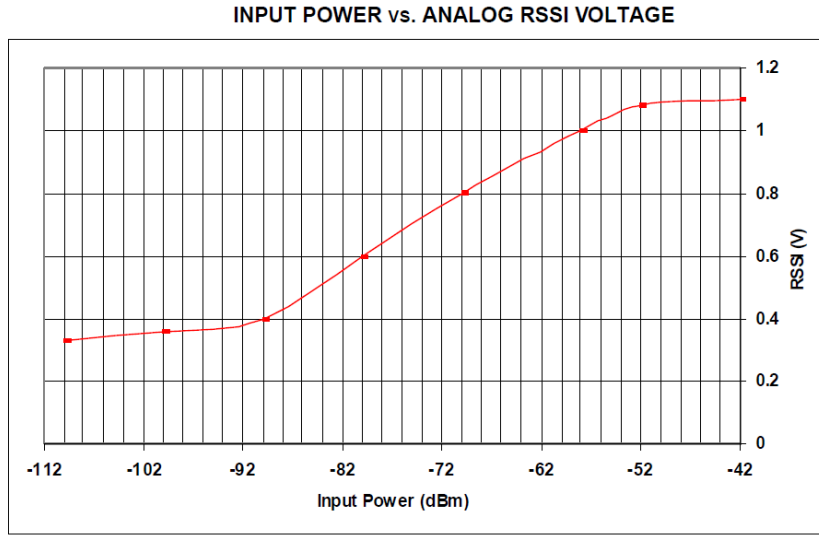


Figura 4.8 – Relação entre o valor de RSSI e a tensão da saída analógica [83].

Da análise do gráfico da figura, observa-se a existência de três zonas distintas.

$$RSSI (dBm) = \begin{cases} -\left(586 - 0.99 * \left(\frac{RSSI(v) * 1024}{2.048}\right)\right) & \text{se } 1.2 < RSSI(v) < 1.08 \\ -\left(111.18 - 0.11 * \left(\frac{RSSI(v) * 1024}{2.048}\right)\right) & \text{se } 1.078 < RSSI(v) < 0.37 \\ -\left(233.45 - 0.77 * \left(\frac{RSSI(v) * 1024}{2.048}\right)\right) & \text{se } 0.368 < RSSI(v) < 0.3 \end{cases} \quad (80)$$

$$RSSI(v) = \begin{cases} (0.00202 * (RSSI(dBm) + 1.18372)) & \text{se } -52 < RSSI(dBm) \leq -42 \text{ dBm} \\ (0.018182 * (RSSI(dBm) + 2.02145)) & \text{se } -92 < RSSI(dBm) \leq -52 \text{ dBm} \\ (0.002597 * (RSSI(dBm) + 0.606364)) & \text{se } -112 < RSSI(dBm) \leq -92 \text{ dBm} \end{cases} \quad (81)$$

A zona mais importante de funcionamento é a zona linear entre os - 52 dBm e os - 92 dBm. No entanto desde que bem definida a região entre os -92 dBm e os -112 dBm pode ser utilizado, bem como a região superior a - 52 dBm.

4.2.1 Hardware

O circuito elétrico do dispositivo rádio, foi desenvolvido de acordo com as recomendações técnicas do fabricante, no sentido de minimizar possíveis erros na implementação circuito. A figura 4.9 ilustra o circuito elétrico recomendado pelo fabricante.

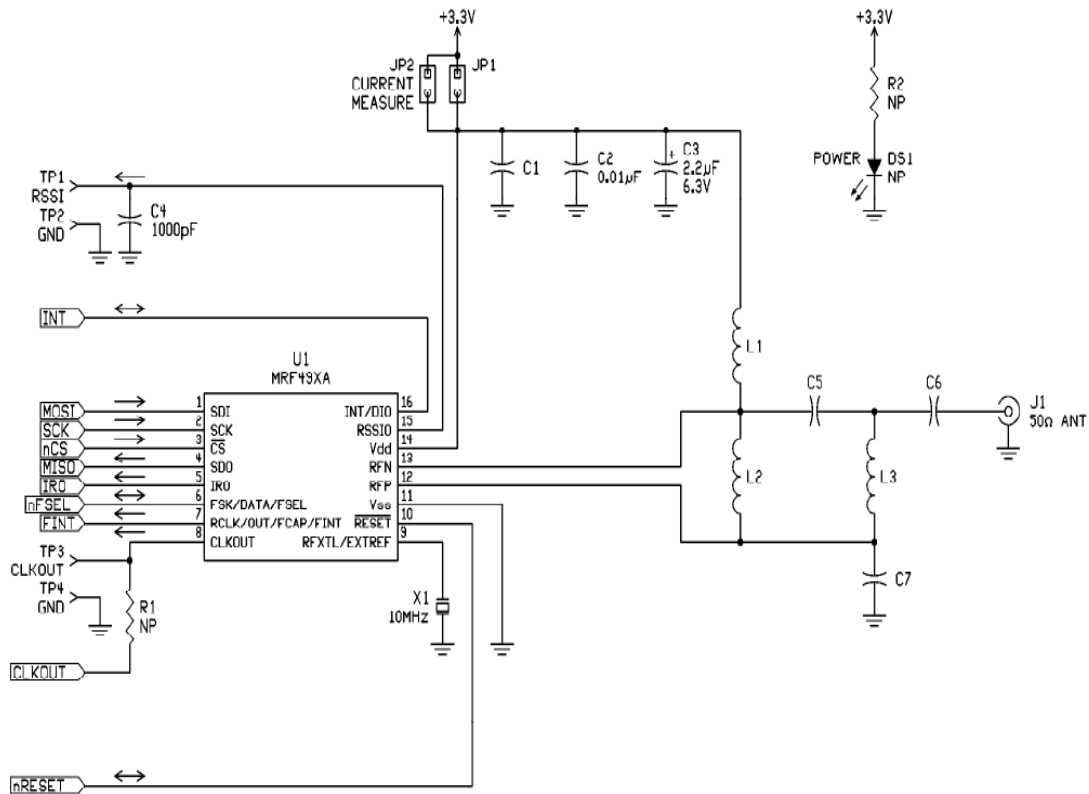


Figura 4.9 – Circuito elétrico recomendado pelo fabricante [83].

Tendo em conta que o *transceiver* rádio pode operar em três bandas ISM distintas, o passo seguinte consistiu na definição da banda de operação 433 MHz e na utilização dos valores dos condensadores e indutâncias a utilizar os quais se encontram definidos na tabela seguinte.

Tabela 4.1 – Dimensionamento dos componentes para as diversas frequências.

Freq.	C1	L1	L2	L3	C5	C6	C7
434 MHz	220 pF	390 nH	33 nH	47 nH	2.7 pF	68 pF	5.1 pF
868 MHz	47 pF	100 nH	8.2 nH	22 nH	1.2 pF	27 pF	2.7 pF
915 MHz	33 pF	100 nH	8.2 nH	22 nH	1.2 pF	27 pF	2.7 pF

As figuras seguintes ilustram a versão final do circuito elétrico implementado para o dispositivo rádio, é de salientar que o circuito proposto incorpora três pinos de IO digitais, dos quais uma delas pode ser configurada como entrada analógica e um canal de comunicação série UART.

O diagrama de blocos do dispositivo rádio da figura 4.10 indica que o microcontrolador possui uma UART, uma interface de ligação SPI com o *transceiver* e permite a programação em circuito ICSP.

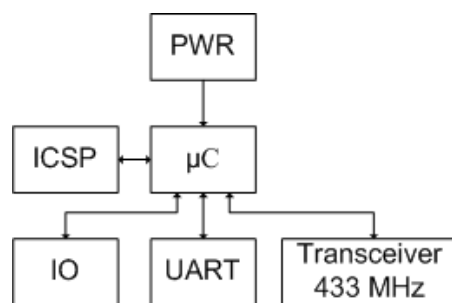


Figura 4.10 – Diagrama de blocos do dispositivo rádio.

Os esquemáticos do circuito elétrico do microcontrolador e do *transceiver* rádio estão representados nas figuras 4.11 e 4.12.

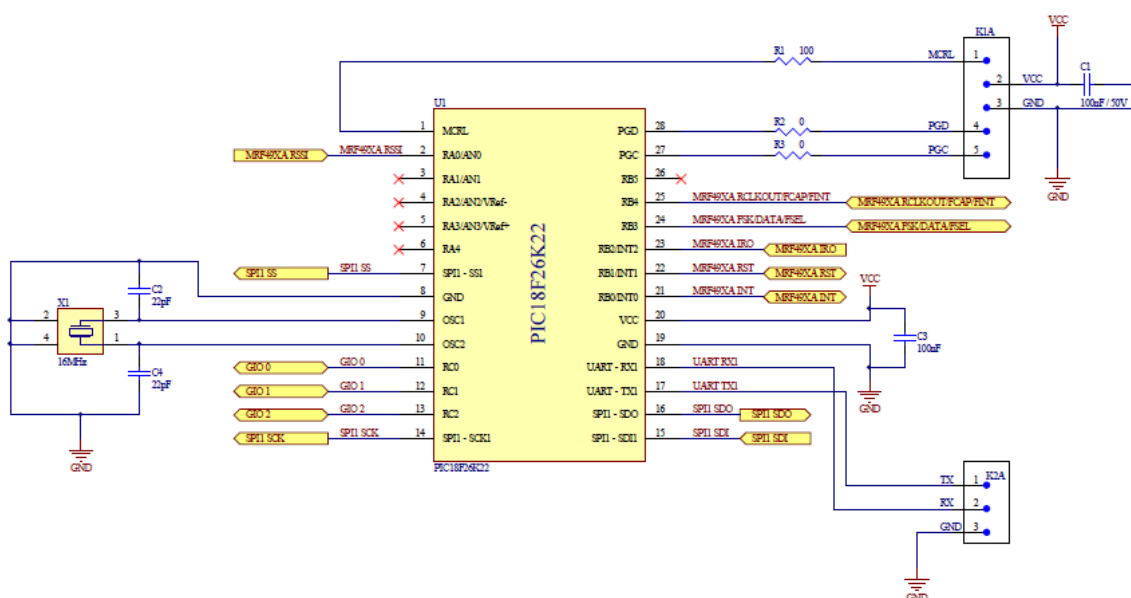


Figura 4.11 – Circuito elétrico do microcontrolador.

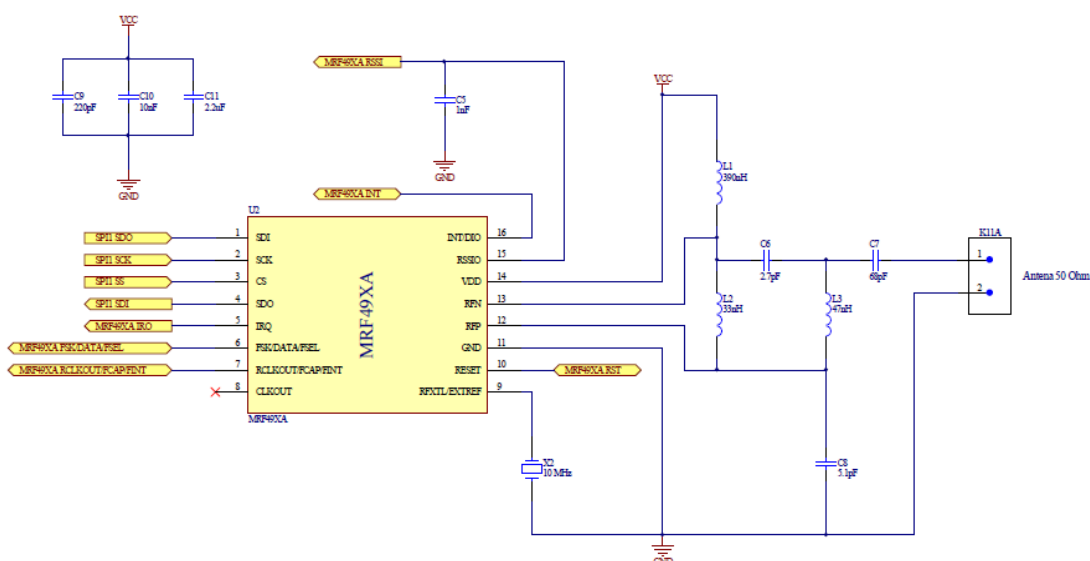


Figura 4.12 – Circuito elétrico do *transceiver* rádio.

Por outro lado, as figuras 4.13 ilustram (face superior e inferior) da placa de circuito impresso do dispositivo rádio as quais foram projetadas usando um programa ORCAD.

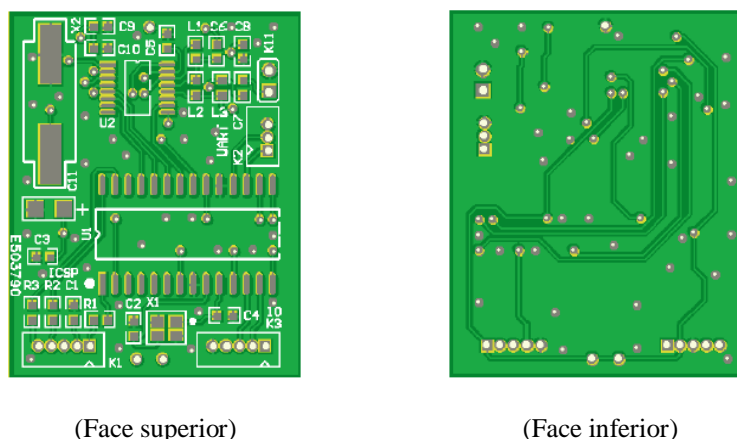


Figura 4.13 – Placa de circuito impresso do dispositivo rádio.

A figura 4.14 representa a implementação prática do dispositivo desenvolvido com os componentes soldados e com uma antena de $\lambda/4$ de comprimento de onda, obtida a partir de um fio condutor. Na face superior é possível ver o microcontrolador, o transceiver rádio, o cristal oscilador e as fichas. Por seu lado na face inferior encontra-se o suporte para uma pilha de lítio, formato CR2450 3V.

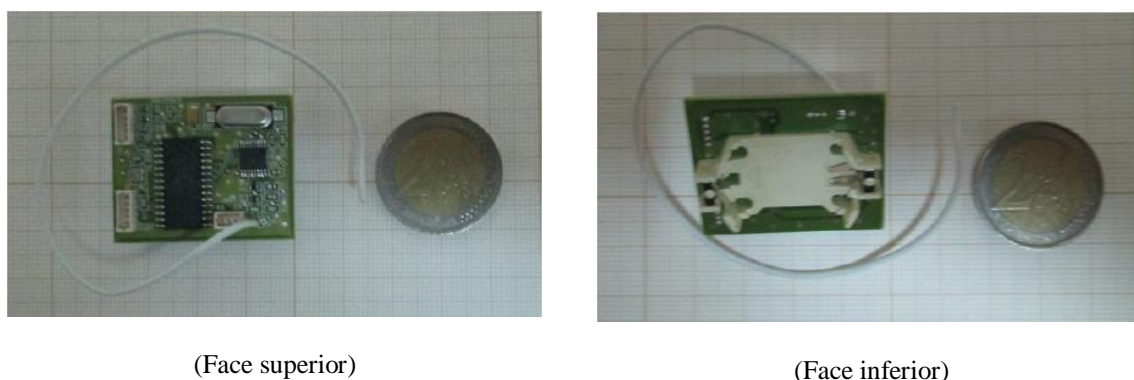


Figura 4.14 – Dispositivo rádio, aspecto final.

4.2.2 Protocolo de comunicação.

O protocolo de comunicação define o modo como os dispositivos rádio irão comunicar entre si. Assim sendo, para o sistema proposto foram definidos três protocolos de comunicação distintos, o primeiro diz respeito à comunicação entre dispositivos móveis com as estações base, o segundo diz respeito à comunicação entre as estações base e o terceiro especifica a comunicação entre a estação base de referência e a unidade central de gestão e processamento de dados.

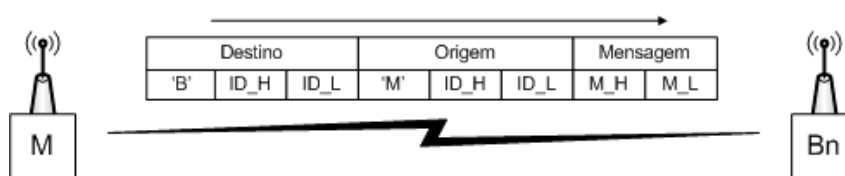


Figura 4.15 – Protocolo de comunicações entre um dispositivo móvel e a estação base.

O protocolo de comunicação entre um dispositivo móvel e as estações base, encontra-se definido por oito bytes divididos em três grupos (destino da mensagem, origem da mensagem e número da mensagem). O primeiro grupo é iniciado com o carácter 'B' para indicar que o destino da mensagem é uma estação base, seguido do número de identificação da estação base com a qual se pretende comunicar.

Nos cenários em que o dispositivo móvel necessita de comunicar com todas as estações base em modo de difusão, utiliza-se como número de identificação do destinatário o endereço 0x00FF. O segundo grupo é iniciado pelo carácter 'M' para indicar que a mensagem tem origem num dispositivo móvel, seguido do número de identificação do dispositivo móvel. Por último é enviado o número da mensagem para efeito de controlo do fluxo. A figura seguinte ilustra um exemplo do protocolo de comunicações implementado entre dispositivos móveis e uma estação base.

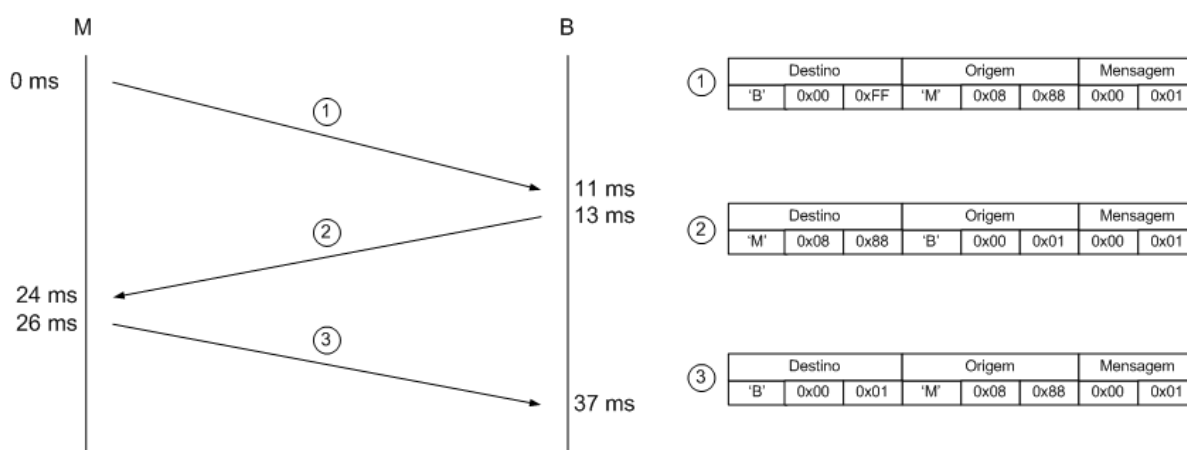


Figura 4.16 – Exemplo do protocolo de comunicações entre um dispositivo móvel e a estação base.

Da figura 4.16, verifica-se que o dispositivo móvel inicia o processo de localização, com o envio de uma mensagem de difusão para todas as estações base. Cada uma das estações base espera um intervalo de tempo em função do seu número de identificação, a estação base cujo número de identificação é menos significativo responde à mensagem após o intervalo de espera e aguarda a resposta do dispositivo móvel, para quantificar o nível de potência do sinal recebido RSSI e o tempo de propagação do sinal em espaço livre. Este processo é repetido pelas restantes estações base envolvidas no sistema, a figura 4.17 ilustra a ocupação do canal rádio durante um processo de localização, efetuado entre quatro estações base e um dispositivo móvel.

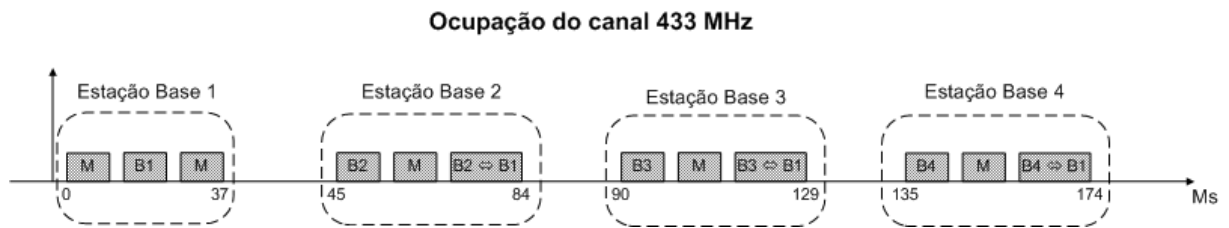


Figura 4.17 – Ocupação do canal rádio durante um processo de localização.

O protocolo de comunicações entre as estações base representado na figura 4.18, encontra-se definido por uma trama de 15 bytes dividida em 6 grupos; (destino da mensagem, estação base que reencaminha a mensagem, origem da mensagem, valor da potência do sinal recebido RSSI pela estação base que reencaminha a mensagem, o número da mensagem e por último o tempo de propagação do sinal rádio entre o dispositivo móvel e a estação base que reencaminha a mensagem).

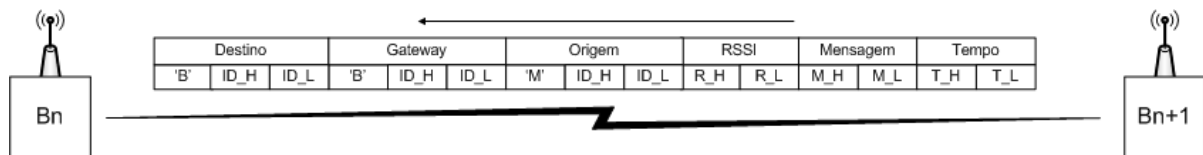


Figura 4.18 – Protocolo de comunicações entre estações base.

Uma mensagem entre duas estações base, segue o mesmo princípio que uma mensagem entre um dispositivo móvel e uma estação base. Apenas foram incluídos 3 grupos adicionais, de modo a que a unidade central de processamento de dados consiga no final de um processo de localização, relacionar os valores de potência do sinal recebido RSSI e os tempos de propagação dos sinais rádio a cada uma das estações base que fazem parte do sistema de rádio localização. A figura 4.19 ilustra um exemplo do protocolo de comunicações implementado entre duas estações base.

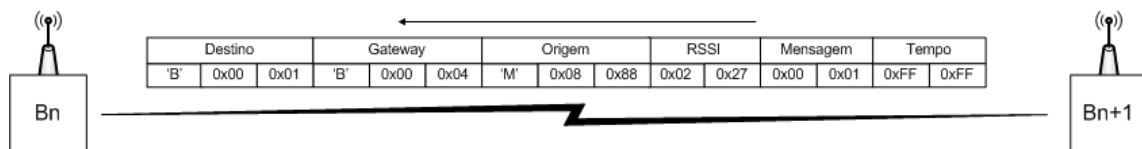


Figura 4.19 – Exemplo do protocolo de comunicações entre duas estações base.

O protocolo de comunicações entre a estação base de referência e a unidade central de processamento, encontra-se definido numa trama de dados em modo de texto com comprimento variável. O conteúdo da mensagem identifica o dispositivo móvel, a estação base que efetuou a medida do nível de potência do sinal recebido RSSI, terminando com o valor da potência do sinal recebido RSSI, o número da mensagem e por último o tempo de propagação do sinal rádio no espaço livre.

ID de destino	ID do Emissor	RSSI (dBm)	Numero da mensagem	Tempo (ns)
00001	02184	-054.1	00034	23077
00001	02184	-054.1	00035	23305
00001	02184	-054.0	00036	23077
00001	02184	-054.1	00037	22841
00001	02184	-053.9	00038	22829

Figura 4.20 – Exemplo do conteúdo de várias mensagens enviadas para a unidade central de gestão e processamento de dados.

A ocupação temporal do canal rádio pode ser observado na figura 4.17. Esta foi definida tendo em consideração o tempo de envio de uma de mensagem entre uma estação base repetidor e um dispositivo móvel, pela expressão (82).

Pode-se quantificar o tempo que demora uma mensagem a ser enviada a uma taxa de 9600 bits por segundo, importa referir que a mensagem rádio além de incluir os bytes que pretendemos enviar, inclui dois bytes iniciais de sincronização, repara-se que como o tempo de propagação da mensagem é na ordem de grandeza mil vezes inferior ao tempo de envio da mensagem, podemos desprezar o tempo de propagação da mensagem e utilizar a expressão (82) para definir a distribuição da ocupação do canal.

$$T(\text{ms}) = \frac{1}{9600} * (10 * N^{\circ} \text{ de bytes a enviar} + 20) \quad (82)$$

Pela expressão (82) pode-se quantificar que o processo de comunicação entre uma estação base repetidor e um dispositivo móvel expressão (83) é na ordem dos 40 ms, definindo assim a distribuição da ocupação do canal rádio em intervalos de tempo 45 ms, este será o valor que será utilizado para sincronizar as estações base num processo de localização.

$$\begin{aligned} T_{\text{Total}}(\text{ms}) &= T_{\text{Br} \Rightarrow \text{M}} + T_{\text{M} \Rightarrow \text{Br}} + T_{\text{Br} \Rightarrow \text{B}} \\ T_{\text{Total}}(\text{ms}) &= 10.5 + 10.5 + 17.7 = 38.7 \end{aligned} \quad (83)$$

Nas equações anteriores:

Br – Estação base repetidor.

B – Estação base.

M – Dispositivo móvel.

4.2.3 Firmware.

Para responder às necessidades, que o sistema de rádio localização proposto exige, foi necessário desenvolver três tipos de firmware distintos, visto que, o sistema proposto possui dispositivos rádio configurados do seguinte modo:

- Dispositivo móvel.
- Dispositivo estação base.
- Dispositivo estação base repetidor.

4.2.3.1 Estrutura comum do *firmware*.

No que concerne à configuração do dispositivo rádio desenvolvidos, foi utilizada uma estrutura comum de *firmware* a todos os dispositivos rádio a qual define a configuração e inicialização do microcontrolador, as definições de *hardware*, a gestão do fluxo de dados, etc. O primeiro passo compreende a configuração do microcontrolador em termos de *hardware*, sendo que numa primeira fase é necessário configurar o circuito do oscilador. Definindo a frequência de oscilação F_{OSC} a 64 MHz. A figura seguinte ilustra o diagrama de blocos do circuito de oscilador e a sua configuração para operar a 64 MHz.

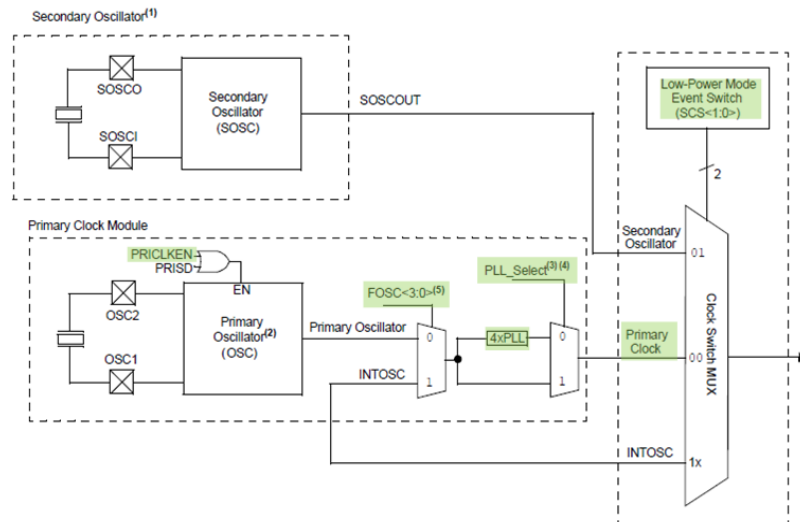


Figura 4.21 – Diagrama de blocos do circuito oscilador do microcontrolador [10].

De seguida apresentam-se as definições utilizadas na configuração do *hardware* do microcontrolador. O passo seguinte consiste na configuração e inicialização de cada um dos periféricos, que terão utilidade para a aplicação em questão, o qual segue uma ordem sequencial representada no fluxograma da figura 4.22.

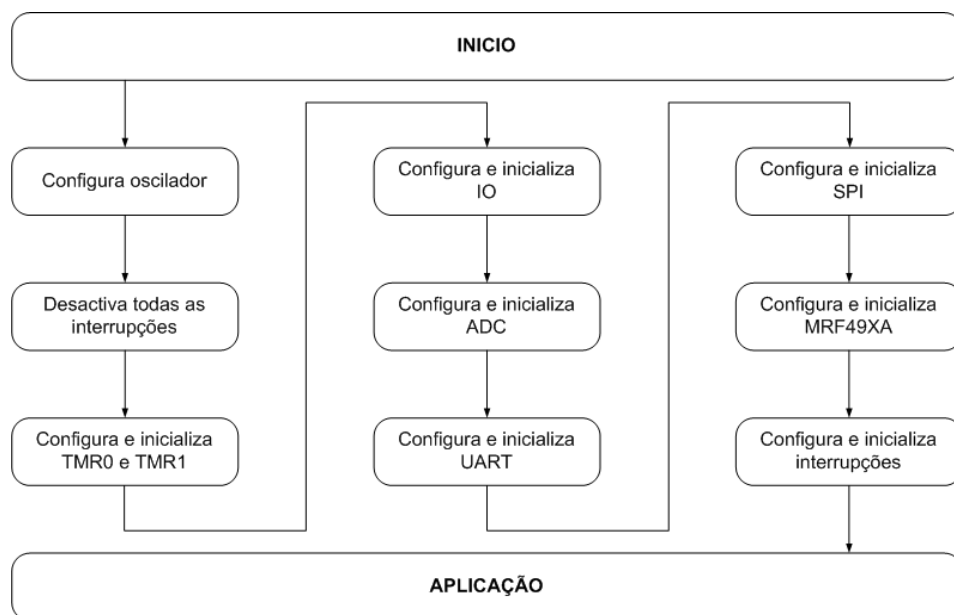


Figura 4.22 – Fluxograma da inicialização e configurações dos periféricos.

Os temporizadores TMR0 e TMR1 podem ser configurados de acordo com os seguintes requisitos:

TMR0

- Origem do relógio $F_{OSC}/4$;
- Modo de 16 bits;
- Divisor de frequência 1:2.

TMR1

- Origem do relógio F_{osc} ;
- Modo de 16 bits;
- Divisor de frequência 1:1.

A figura 4.23 apresenta o diagrama de blocos dos temporizadores configurados para 16 bits.

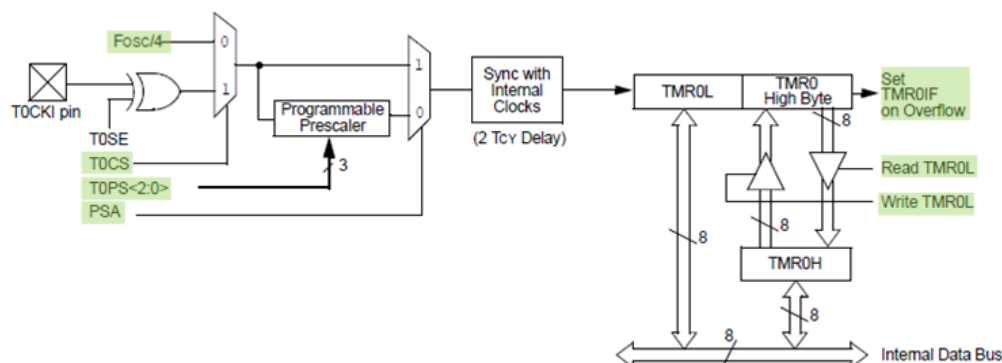


Figura 4.23 – Diagrama de blocos do temporizador *TMR0* configurado a 16 bits [10].

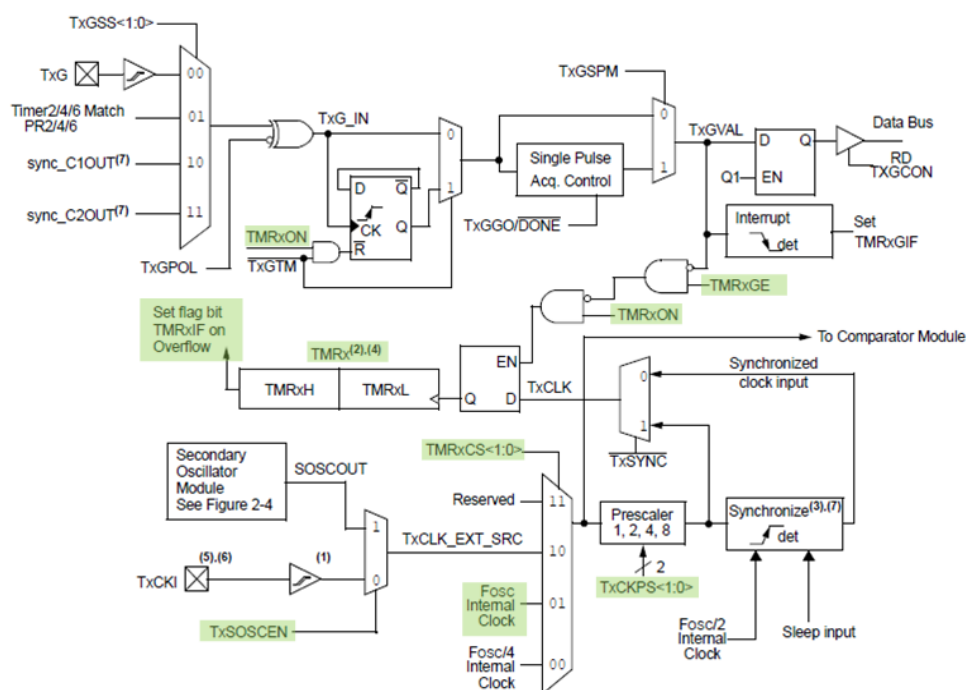


Figura 4.24 – Diagrama de blocos do temporizador *TMR1* configurado a 16 bits [10].

Os três pinos IO disponíveis no dispositivo rádio, podem ser configurados como entradas ou saídas digitais, dos quais uma delas pode ainda ser configurada como entrada analógica que é o caso do PINO_RC2, a figura seguinte ilustra o diagrama de blocos genérico dos portos IO do microcontrolador. Como não está definida uma aplicação específica para os pinos IO, os mesmos serão configurados como saídas digitais e inicializados com o valor lógico zero.

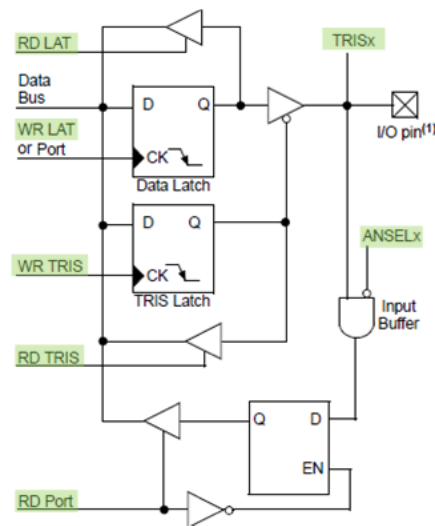


Figura 4.25 – Diagrama de blocos genérico dos portos *IO* [10].

O conversor analógico digital ADC, terá a função de quantificar o valor da potência do sinal recebido RSSI disponibilizado pelo *transceiver* rádio MRF49XA, tendo sido configurado do seguinte modo:

ADC

- Tensão de referência interna de 2.048 V;
- Resultado da conversão justificado à direita.
- Origem do relógio $F_{osc}/64$, ciclo de relógio do ADC 1 MHz;
- Tempo dedicado a amostragem e retenção de uma amostra, definido em 12 μs ;

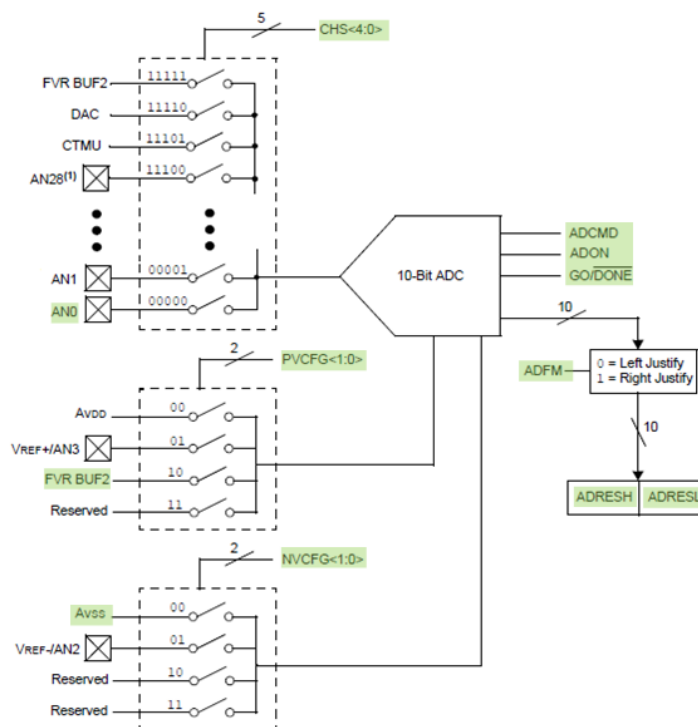


Figura 4.26 – Diagrama de blocos do conversor *ADC* [10].

O periférico de comunicação série UART, tem como finalidade reenviar a informação recebida pelo *transceiver* rádio para a aplicação central de processamento de dados. Apenas a estação base com o número de identificação menos significativo é que na prática irá utilizar este recurso, os restantes dispositivos rádio não necessitam desta funcionalidade. O canal de comunicação UART foi configurado do seguinte modo:

UART

- Modo de 8 bits;
- Taxa de transmissão de 115200 *bps*;
- Modo de comunicação assíncrono;
- No estado inativo a linha TX possui nível lógico ‘1’;
- Linha RX ativado no nível lógico zero;

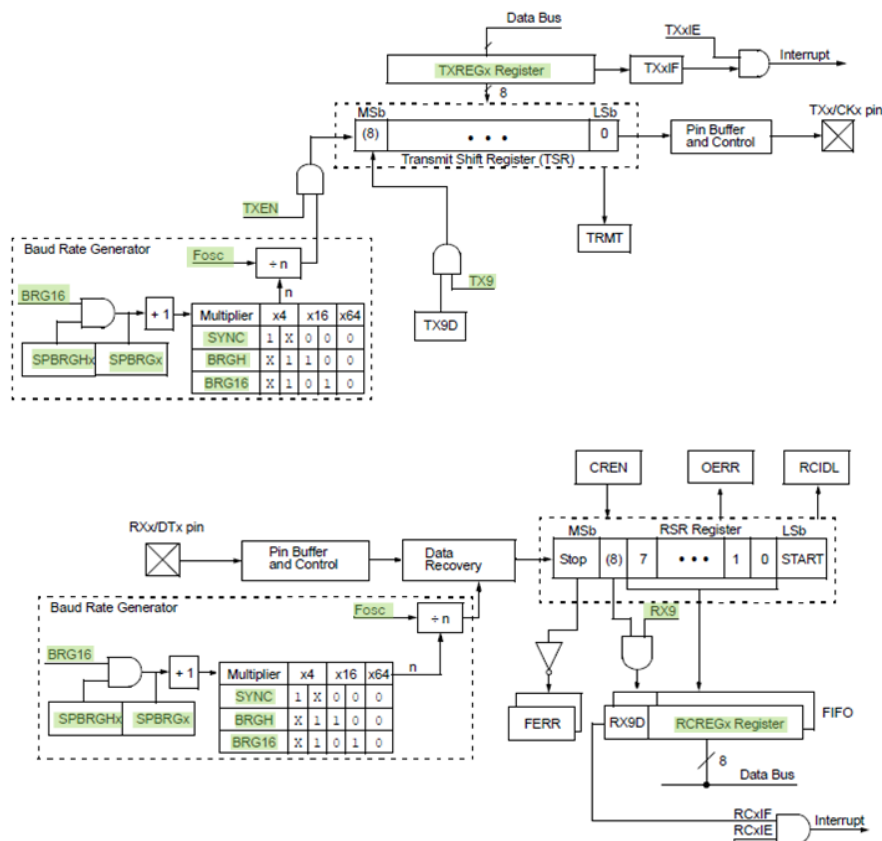


Figura 4.27 – Diagramas de blocos do transmissor e receptor *UART* [10].

O periférico de comunicação série SPI, tem como finalidade servir de interface entre o microcontrolador e o *transceiver* rádio, o periférico deve ser configurado do seguinte modo:

SPI

- Modo *master*;
- Taxa de transmissão de 1 *Mbps*;
- Modo 0 de comunicação;

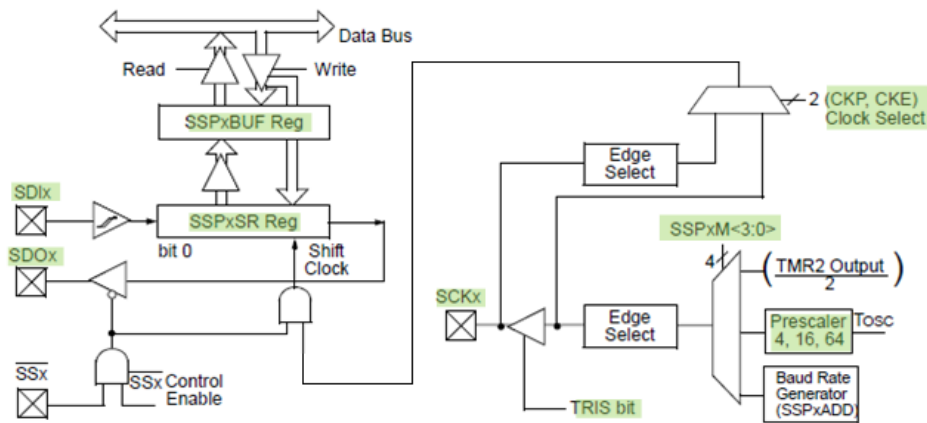


Figura 4.28 – Diagrama de blocos do periférico *SPI* [10].

Em termos de periféricos internos, apenas falta a configuração e a inicialização das interrupções. Uma interrupção é uma alteração do fluxo normal do programa provocado por um evento. Evento esse que poderá ser por exemplo a recepção de um byte por um dos canais de comunicação série ou simplesmente a mudança de estado de um pino IO. Para a aplicação a desenvolver pretende-se as seguintes interrupções:

Interrupções

- Interrupção gerada pelo *overflow* do *TMR0*, o temporizador *TMR0* será utilizado como temporizador da aplicação, por exemplo para gerar atrasos;
- Interrupção gerada pelo *overflow* do *TMR1*, o temporizador *TMR1* será utilizado como contador de tempo, tem como aplicação quantificar o tempo de processamento e propagação de uma mensagem via rádio;
- Interrupção gerada pela recepção de um byte pela *UART*, nas comunicações entre o microcontrolador e o terminal RS232;
- Interrupção gerada pela recepção de um byte pela *SPI*, nas comunicações entre o microcontrolador e o *transceiver* rádio;
- Interrupção gerada pelo pino de interrupção do *transceiver* rádio MRF49XA, na recepção de um byte válido o *transceiver* rádio informa o microcontrolador a existência de dados válidos através do pino *INT*.

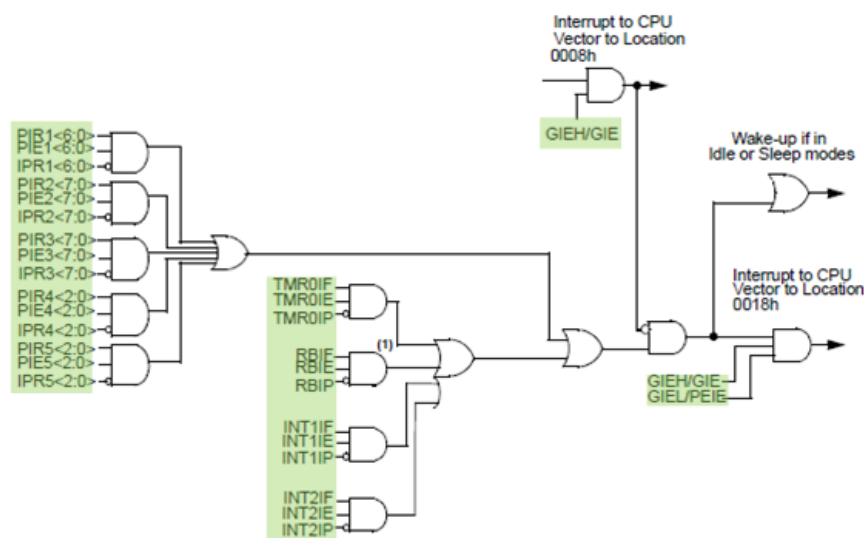


Figura 4.29 – Diagrama lógico das interrupções [10].

O passo seguinte compreende a inicialização e configuração do transceiver rádio MRF49XA. Para o efeito pretende-se configurar o transceiver rádio para operar nas seguintes condições:

MRF49XA

- Gerar uma interrupção na recepção de um byte;
- Operar na banda de frequência 433 MHz;
- Definição da frequência central para 434,24 MHz;
- Taxa de transmissão 9600 bps;
- Atenuação do LNA 0 dB;
- Potência do transmissor 0dBm;
- Largura de banda do modulador 45 kHz;
- Largura de banda do receptor 67 kHz;

A figura 4.30 apresenta o diagrama de blocos funcional do *transceiver* rádio MRF49XA.

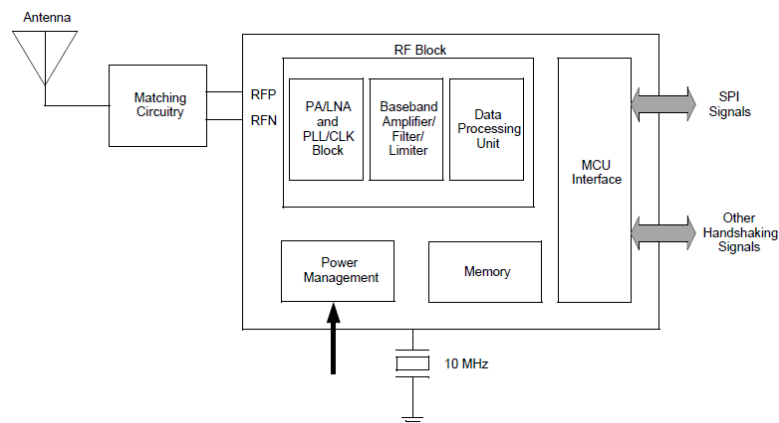


Figura 4.30 – Diagrama de blocos funcional do transceiver rádio **MRF49XA** [11].

A inicialização e configuração do *transceiver* rádio MRF49XA, é feita através de uma sequência de escrita nos registos internos de configuração do *transceiver*. A inicialização é realizada de acordo com os seguintes passos:

- *FIFORSTREG* – Define o modo como é sinalizado a recepção com sucesso de um byte e o modo de funcionamento da *FIFO*.
- *GENCREG* – Activa a *FIFO* e selecciona a banda de frequência.
- *AFCCREG* – Activa o controlo automático de frequência.
- *CFSREG* – Define a frequência central.
- *DRSREG* – Define a taxa de transmissão.
- *PMCREG* – Desliga a função de *clock out*. A função de *clock out* poderá ser utilizado para sincronismo com outros periféricos ou ser a fonte de relógio do próprio microcontrolador.
- *RXCREG* – Define o modo de funcionamento do receptor.
- *TXCREG* – Define o modo de funcionamento do transmissor.
- *PMCREG* – Activa o transmissor.
- Espera 5 ms, para a estabilização do oscilador.
- *PMCREG* – Desliga o transmissor e activa o receptor.

- *GENCREG* – Activa a *FIFO* e selecciona a banda de frequência.
- *FIFORSTREG* – Define o modo como é sinalizada a recepção com sucesso de um byte e o modo de funcionamento da *FIFO*.
- *STSREG* – Limpa as *flags* do registo de estado.

Após a conclusão da configuração do *transceiver* rádio, o mesmo encontra-se configurado no modo de funcionamento de recepção. A partir deste ponto o *transceiver* rádio pode ser configurado em três modos de funcionamento; transmissão; recepção e adormecido. Cada modo de funcionamento pode ser configurado de acordo com os seguintes passos:

Transmissão

- *PMCREG* – Desliga o transmissor e o receptor.
- *GENCREG* – Activa a *FIFO* e selecciona a banda de frequência.
- *PMCREG* – Activa o transmissor.

Recepção

- *PMCREG* – Desliga o transmissor e activa o receptor.
- *GENCREG* – Activa a *FIFO* e selecciona a banda de frequência.
- *FIFORSTREG* – Define o modo como é sinalizado a recepção com sucesso de um byte e o modo de funcionamento da *FIFO*.

Adormecido

- *STSREG* – Limpa as *flags* do registo de estado.
- *FIFORSTREG* – Desliga o modo de reset.
- *GENCREG* – Activa a *FIFO* e selecciona a banda de frequência.
- *PMCREG* – Desliga o transmissor e o receptor.

4.2.3.2 Dispositivo móvel.

O princípio de funcionamento do dispositivo móvel, consiste em fazer com que ao fim de um período de tempo o dispositivo móvel acorde e envie uma mensagem de “*Wake Up*” para toda a rede. A técnica utilizada para acordar o dispositivo móvel ao fim de um período de tempo é baseada no temporizador “*Watchdog*”.

Este temporizador acorda o microcontrolador após o estado de adormecido e volta a executar o programa a partir do ponto onde tinha parado. Para activar esta funcionalidade é necessário na configuração do *hardware* do microcontrolador, incluir e activar o temporizador “*Watchdog*” e o período para o qual ao fim desse tempo, o microcontrolador deve comutar do modo adormecido para o modo normal de funcionamento.

Após o envio da mensagem de “*Wake Up*”, o dispositivo móvel aguarda uma resposta de uma estação base, se ao fim de 200 ms não receber nenhuma resposta o dispositivo móvel volta a entrar no modo adormecido, no caso de receber uma resposta de uma estação base, o dispositivo móvel reenvia uma nova mensagem direccionada para a estação base que o contactou, terminando este processo com a entrada novamente no modo adormecido.

A figura seguinte apresenta o fluxograma do programa implementado para os dispositivos móveis.

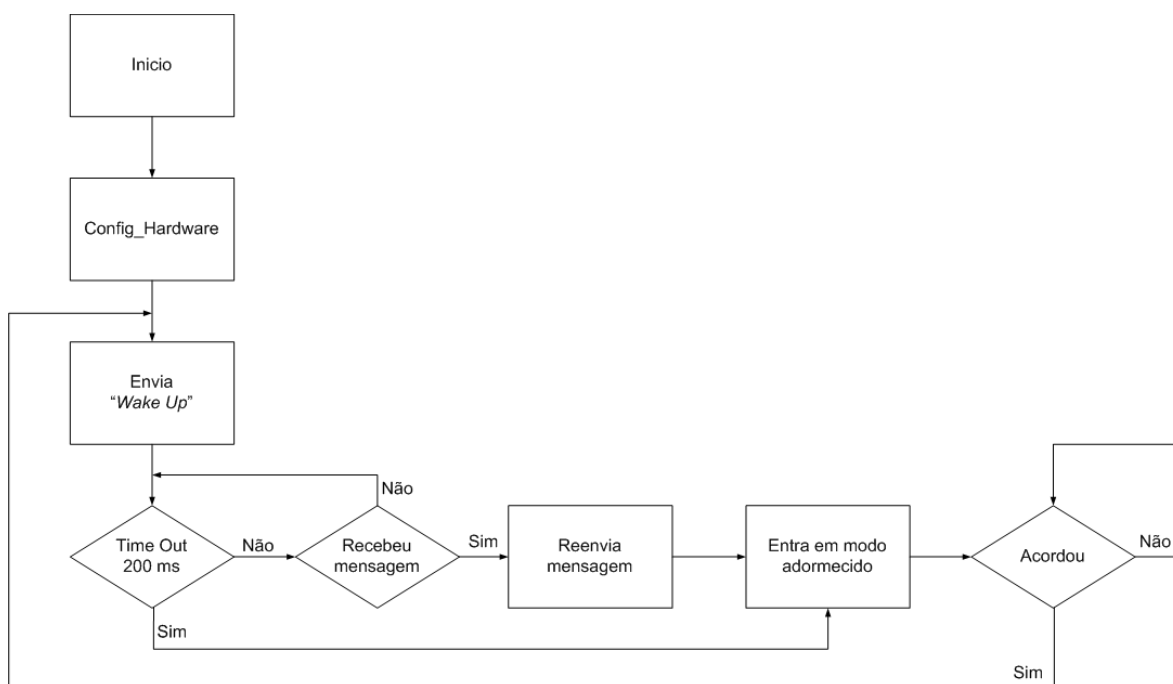


Figura 4.31 – Fluxograma do programa implementado para os dispositivos móveis.

De acordo com o protocolo de comunicações definido, na recepção de mensagens, o dispositivo móvel tem a capacidade de verificar se o destino da mensagem é o próprio dispositivo móvel, caso afirmativo, o dispositivo móvel reenvia uma mensagem para a estação base, cuja identificação da estação base encontra-se definida no campo ‘origem da mensagem’, da mensagem recebida. No caso do destino da mensagem não ser o próprio dispositivo móvel, a mesma é ignorada.

4.2.3.3 Dispositivo estação base repetidor.

As estações base têm a funcionalidade de medirem o nível de potência do sinal recebido RSSI e o tempo de propagação do sinal, e encaminha esses dados ou para uma outra estação base de referência ou para a unidade central de processamento de dados. No caso de uma estação base ter a função de reencaminhar os dados para uma outra estação base de referência, a estação base que reencaminha os dados é denominada por estação base repetidor.

Quando uma estação base repetidor recebe uma mensagem de “Wake Up” por parte de um dispositivo móvel, prepara o reenvio de uma nova mensagem cujo destino da mensagem é o dispositivo móvel identificado na mensagem recebida e aguarda um período de tempo proporcional ao número de identificação da estação base envolvida.

Ao enviar esta nova mensagem é activado o temporizador *TMR1* e a estação base repetidor aguarda a recepção de uma resposta por parte do dispositivo móvel. Ao receber essa resposta desactiva o temporizador *TMR1* e mede o nível da potência do sinal recebido RSSI, encaminhando o resultado para uma estação base de referência descrito anteriormente, de acordo com o protocolo de comunicações entre estações base.

A recepção e filtragem das mensagens seguem o mesmo algoritmo utilizado nos dispositivos móveis, com a diferença de na recepção de uma nova mensagem válida, ter-se incluído um bloco funcional de medida da potência do sinal recebido RSSI na recepção de cada byte. Repare-se que o nível da potência do sinal recebido RSSI final, corresponde à média aritmética do valor do RSSI quantificado na recepção de cada um dos oito bytes da mensagem. A figura 4.32 ilustra o fluxograma do programa implementado para as estações base repetidor, o programa principal e o bloco de programa para a recepção e filtragem de mensagens.

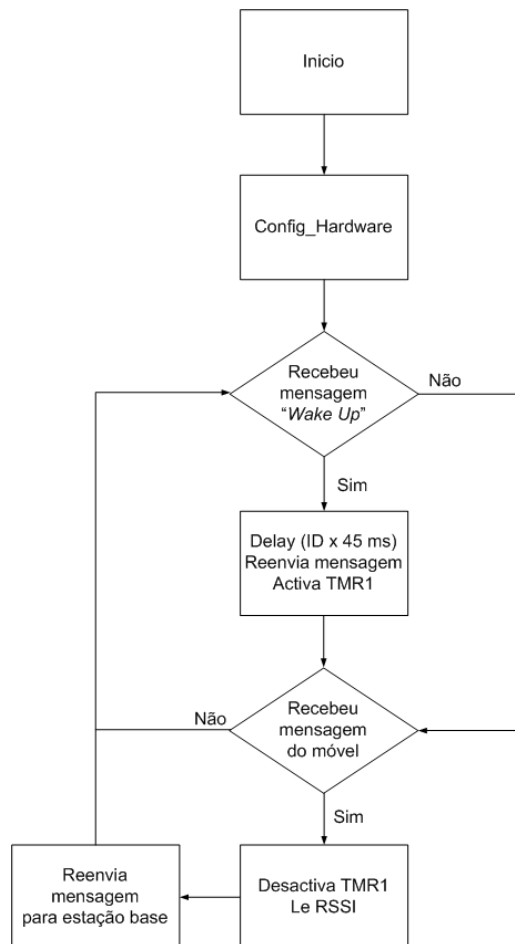


Figura 4.32 – Fluxograma do programa implementado para as estações base repetidoras.

4.2.3.4 Dispositivo estação base.

A estação base de referência, denominada apenas por estação base, possui a função de quantificar o nível de potência do sinal recebido RSSI e o tempo de propagação do sinal em espaço livre proveniente dos dispositivos móveis. Para além disso serve de ponte de ligação entre as estações base repetidores e a unidade central de processamento de dados e encaminhar pelo canal série UART os dados relativos às comunicações entre os dispositivos móveis e a estação base para a unidade central de processamento de dados.

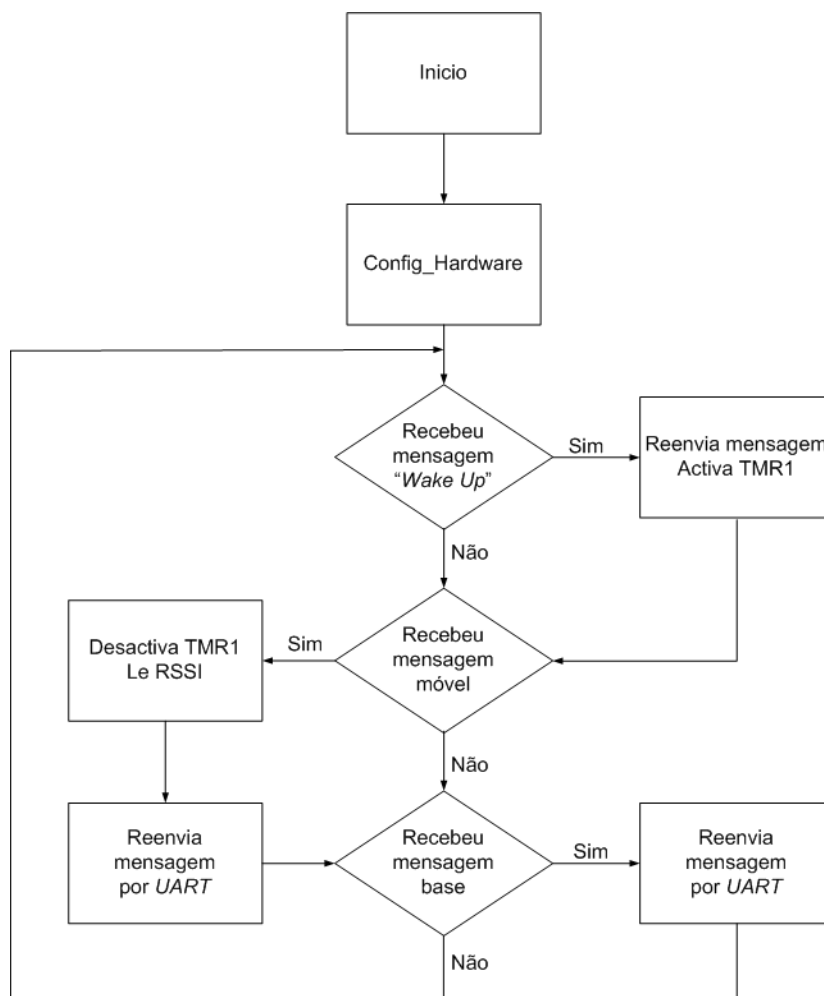


Figura 4.33 – Fluxograma do programa implementado para as estações base.

4.3 Software de monitorização do sistema.

Para monitorizar o sistema de rádio localização, foi desenvolvido um programa em *Visual Basic*. O *software* foi concebido com o intuito de monitorizar em tempo real a localização dos dispositivos móveis ativos no sistema, permitindo também monitorizar a trajetória de um dispositivo móvel durante um dado período de tempo, através da consulta a base de dados.

Pela análise do diagrama funcional, figura 4.34, pode-se verificar a existência de dois modos de funcionamento distintos. O primeiro modo de funcionamento é caracterizado por monitorizar em tempo real os vários dispositivos móveis ativos no sistema. A estimativa da localização é efetuada recorrendo à lateração circular por máxima verosimilhança descrita na expressão (35). Ao receber um grupo de mensagens referentes a um processo de localização, os mesmos são guardados na base de dados e em função do nível de potência do sinal recebido **RSSI**, os dados são convertidos em distâncias. De seguida é determinada uma estimativa da possível localização do dispositivo móvel.

O segundo modo de funcionamento é caracterizado por monitorizar uma trajetória de um dispositivo móvel durante um período de tempo pré definido. A estimativa da trajetória é realizada igualmente recorrendo à lateração circular por máxima verosimilhança de cada um dos pontos que definem a trajetória.

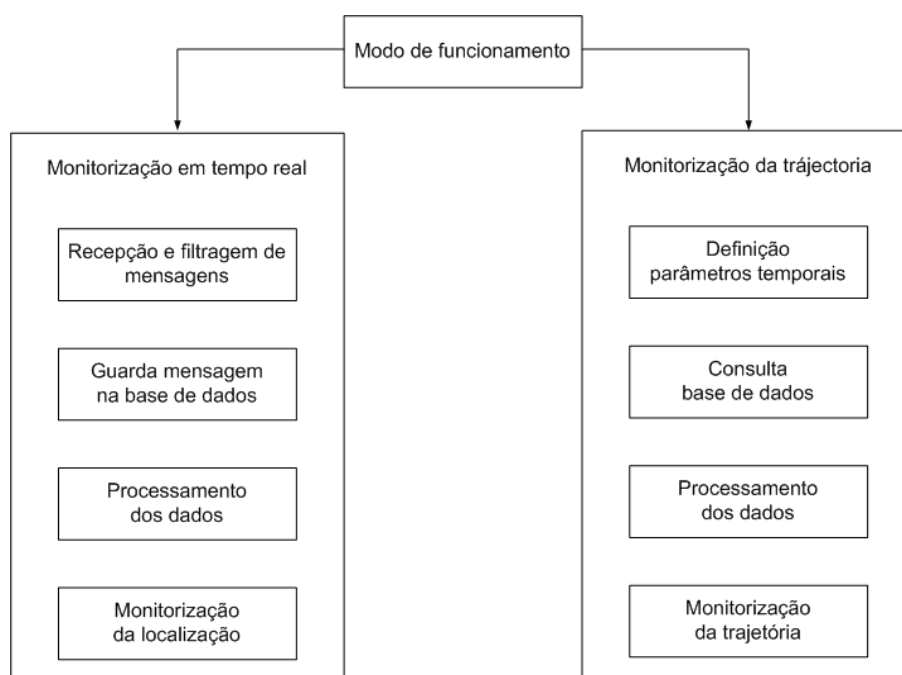


Figura 4.34 – Diagrama funcional do *software* implementado para o sistema de rádio localização.

O *software* implementado é parte integrante da unidade central de gestão e processamento de dados, cuja interface com a estação base de referência é feita por comunicação série RS232 de acordo com o protocolo de comunicações definido anteriormente entre a estação base de referência e a unidade central de gestão e processamento de dados.

Independentemente do modo de funcionamento, na inicialização do *software* é necessário, como primeiro passo, configurar os parâmetros de rádio frequência, estes parâmetros dizem respeito à localização geográfica das estações base, e aos coeficientes A, B e C da expressão que define a distância em função do nível da potência do sinal recebido.

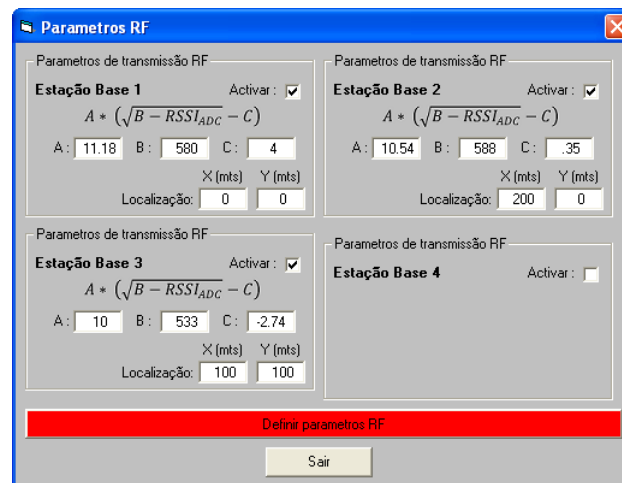


Figura 4.35 – Janela de configuração dos parâmetros do modelo.

Após a definição dos parâmetros do modelo de propagação de cada uma das estações base envolvidas no sistema de rádio localização, é necessário definir as dimensões da área de cobertura do sistema, terminado este processo com a seleção do modo de funcionamento (tempo real, trajetória). As figuras 4.36 e 4.37 apresentam as interfaces criadas para interagir com o *software* de monitorização do sistema.

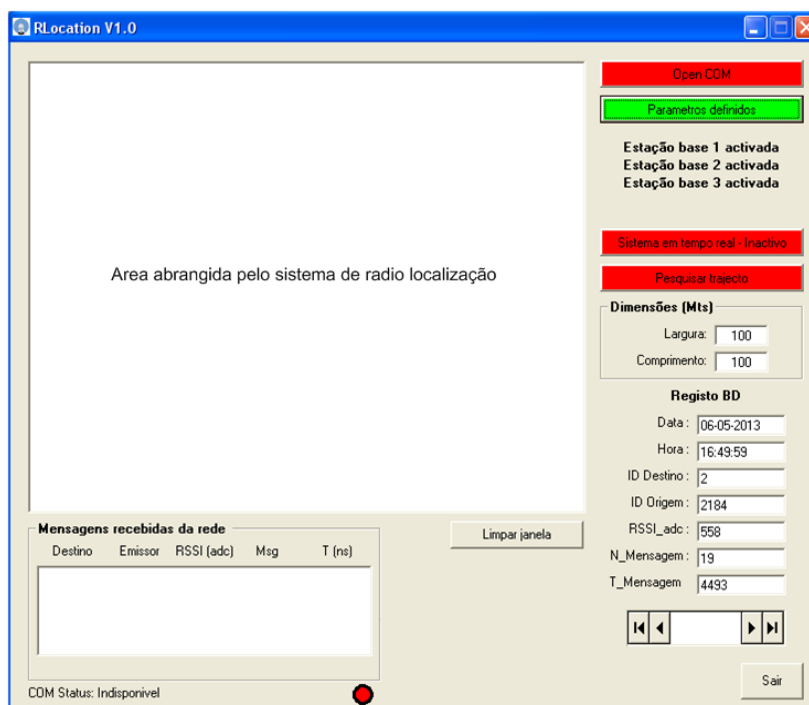


Figura 4.36 – Interface com o utilizador do *software* implementado.

A necessidade de configurar os parâmetros do modelo de propagação, para cada uma das estações base envolvidas no sistema de localização figura 4.35, deve-se ao facto de se ter verificado que para as mesmas condições, que o nível da potência do sinal rádio recebido de um dado dispositivo móvel pelas diversas estações base era ligeiramente diferente, sendo portanto necessário proceder à sua calibração.

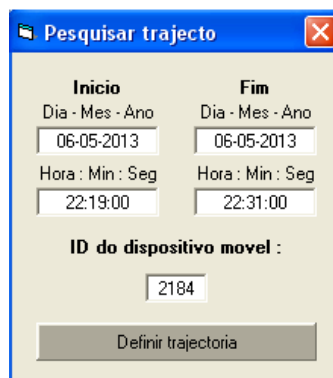
A janela de software intitulada "Pesquisar trajecto" possui uma interface com fundo bege e uma barra de título azul. Ela contém dois campos de data e hora, um para o início e outro para o fim, ambos com o formato "Dia - Mes - Ano" e "Hora : Min : Seg". Os valores preenchidos são 06-05-2013 e 22:19:00 para o início, e 06-05-2013 e 22:31:00 para o fim. Abaixo desses campos, há um campo rotulado "ID do dispositivo movel :" com o valor 2184. No rodapé da janela, há um botão cinza com o texto "Definir trajetoria".

Figura 4.37 – Janela de configuração dos parâmetros temporais de pesquisa da trajetória.

4.4 Conclusão

Este capítulo descreve o método utilizado para a implementação do sistema de rádio localização proposto. Inicialmente são apresentados os requisitos funcionais do sistema, seguido de uma análise de três técnicas de rádio localização possíveis e viáveis de serem implementadas, o qual se conclui que para dar cumprimento aos requisitos funcionais propostos, o método mais indicado seria o método cujo os dispositivos móveis, na sua maior parte do tempo se encontram no modo adormecido, prolongando assim a sua capacidade energética.

Após a apresentação do sistema a implementar, expôs-se a plataforma de *hardware* desenvolvida, o dispositivo rádio desenvolvido foi construído tendo por base o microcontrolador PIC18F26K22 e o *transceiver* rádio MRF49XA, ambos da *Microchip*. O *transceiver* rádio possui uma saída analógica cujo valor de tensão está relacionado com o nível de potência do sinal rádio recebido. Na recepção de cada byte de uma trama de bytes o microcontrolador mede o valor da saída analógica do *transceiver* rádio, determina a sua média e envia o resultado ou para a estação base de referência, via rádio, ou diretamente para a unidade central de processamento pelo canal série RS232.

Neste capítulo definiu-se ainda o protocolo de comunicações implementado, para que a rede funcione eficazmente, terminado o capítulo com a descrição do *software* de monitorização do sistema de rádio localização proposto.

5 Resultados experimentais e simulações

O presente capítulo apresenta os resultados experimentais e os procedimentos utilizados, na realização de uma campanha de medidas de forma a aferir a viabilidade da utilização do sistema proposto de rádio localização. Numa primeira fase, pretendeu-se validar o dispositivo rádio em termos de *hardware* e *firmware*. Para o efeito procedeu-se a testes de alcance e à determinação da estimativa da função da distância em relação ao nível de potência do sinal recebido RSSI. Foi também verificado e analisado o impacto dos refletores nas antenas dos dispositivos rádio. Após a validação dos dispositivos rádio e do respectivo protocolo de comunicações, o passo seguinte compreendeu a verificação do comportamento do sistema de rádio localização em vários cenários. Foram efetuados testes de verificação e análise em dois cenários distintos, um deles com obstáculos na periferia da área onde se pretende implementar o sistema e outro sem obstáculos. Por último procedeu-se à verificação do *software* e por consequência à validação do sistema de rádio localização proposto.

5.1 Verificação e validação do *hardware* proposto.

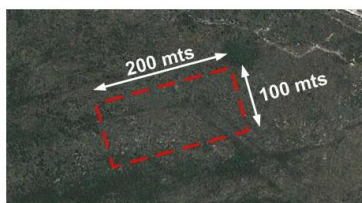
A verificação e validação do *hardware* proposto consistiram na implementação de uma série de ensaios, de modo a validar os seguintes parâmetros:

- Desempenho do protocolo de comunicação implementado.
- Determinação da função da distância em função do nível de potência do sinal rádio recebido RSSI.

Os testes de validação e verificação do *hardware*, foram efetuados em dois cenários distintos, designados por cenário 1 e 2. O primeiro cenário é caracterizado por uma área em ambiente rural, com árvores e casas à volta da área de cobertura do sistema de localização, como se pode observar na figura 5.1 a). O segundo cenário é caracterizado por uma área em ambiente exterior, sem a presença de árvores e casas que possam gerar distúrbios na propagação das ondas de rádio. Este cenário encontra-se representado na figura 5.1 b).



Cenário	1
Localização	Sangalhos
Latitude	49°29'49.55N
Longitude	8°28'36.12O
Altura da base (m)	3
Altura do móvel (m)	1
Antena da base	Fio condutor
Antena do móvel	Fio condutor
Potencia TX (dBm)	0
Sensibilidade RX (dBm)	-110



Cenário	2
Localização	Fontelo
Latitude	41°07'33.43N
Longitude	7°44'32.07O
Altura da base (m)	3
Altura do móvel (m)	1
Antena da base	ANT-4HEL2-SMA
Antena do móvel	Fio condutor
Potencia TX (dBm)	0
Sensibilidade RX (dBm)	-110

Figura 5.1 – Localização e definição dos cenários 1 e 2.

Ensaio nº1 – No primeiro ensaio, o objetivo foi determinar uma estimativa da função que relaciona a distância entre a estação móvel e a estação base com o nível de potência do sinal recebido RSSI_ADC. Neste ensaio também se pretende analisar o algoritmo utilizado para determinar o tempo de propagação do sinal em espaço livre. Os dispositivos rádio foram configurados de acordo com as configurações definidas para o cenário 1.

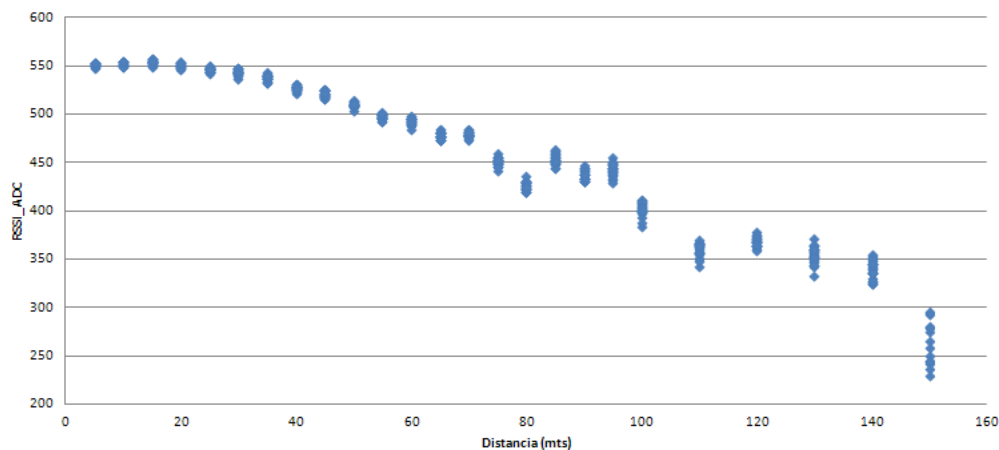


Figura 5.2 – Resultados obtidos pela estação base 1, no ensaio nº 1.

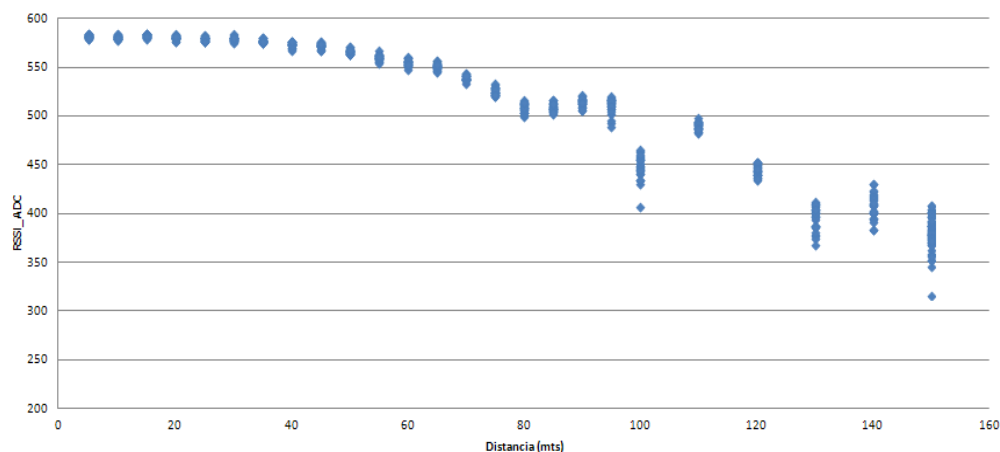


Figura 5.3 – Resultados obtidos pela estação base 2, no ensaio nº 1.

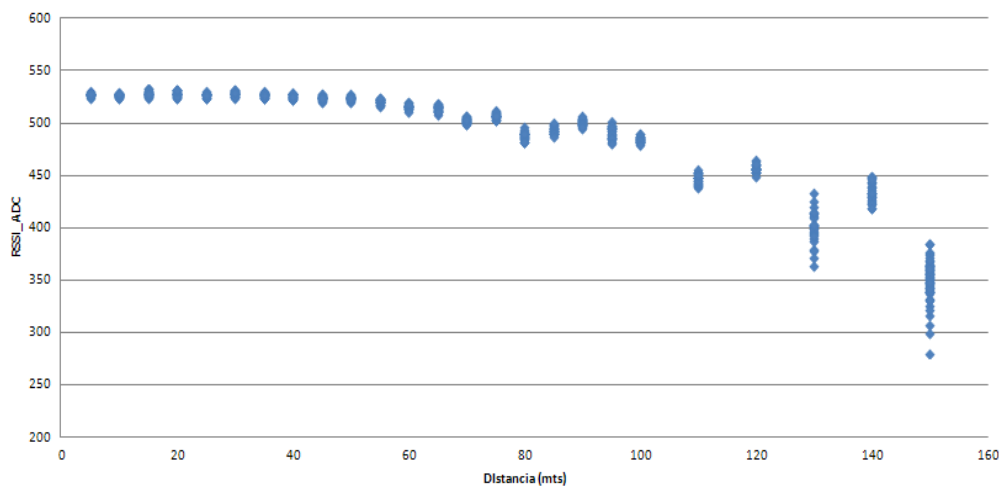


Figura 5.4 – Resultados obtidos pela estação base 3, no ensaio nº 1.

Pela análise dos dados obtidos no primeiro ensaio foram estimadas as funções que definem a distância em relação ao nível de potência do sinal recebido RSSI_ADC expressões (84), (85) e (86).

$$d_{B1}(m) = 11.18 * (\sqrt{(580 - RSSI_{ADC})} - 4) \quad (84)$$

$$d_{B2}(m) = 10.54 * (\sqrt{588 - RSSI_{ADC}} - 0.35) \quad (85)$$

$$d_{B2}(m) = 10 * (\sqrt{(533 - RSSI_{ADC})} + 2.74) \quad (86)$$

As expressões (84), (85) e (86) foram obtidas a partir do polinómio de segundo grau da linha de tendências, que resultou da análise realizada pelo *Excel* para cada um dos gráficos. Dos dados obtidos e análise da figura da localização do ensaio nº 1, pode-se verificar o impacto causado pelo conjunto de árvores situadas a aproximadamente a meio da figura 5.5, inicialmente foram desprezadas mas verifica-se o forte impacto provocado pela interferência multipercurso gerado pelas reflexões das ondas de rádio.



Figura 5.5 – Presença de obstáculos na propagação das ondas de rádio.

Também é possível verificar que ao enviar diretamente o valor do nível de potência do sinal recebido RSSI_ADC em vez do valor do nível de potência do sinal recebido RSSI em dBm que processo se torna mais eficiente. Verifica-se que a diferença entre os gráficos encontra-se apenas na translação do gráfico sobre o eixo do nível de potência do sinal recebido RSSI_ADC, de resto verifica-se o mesmo comportamento ao longo da distância e para as mesmas distâncias.

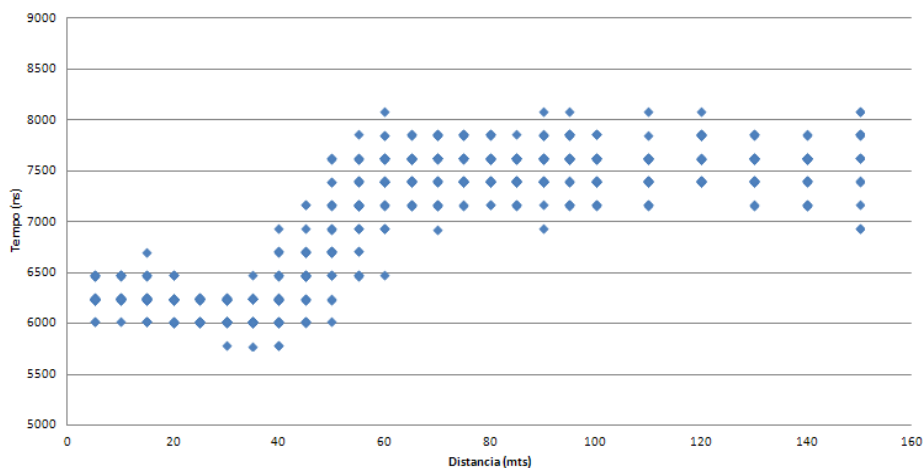


Figura 5.6 – Tempo de propagação do sinal detetada pela estação base 1, no ensaio nº 1.

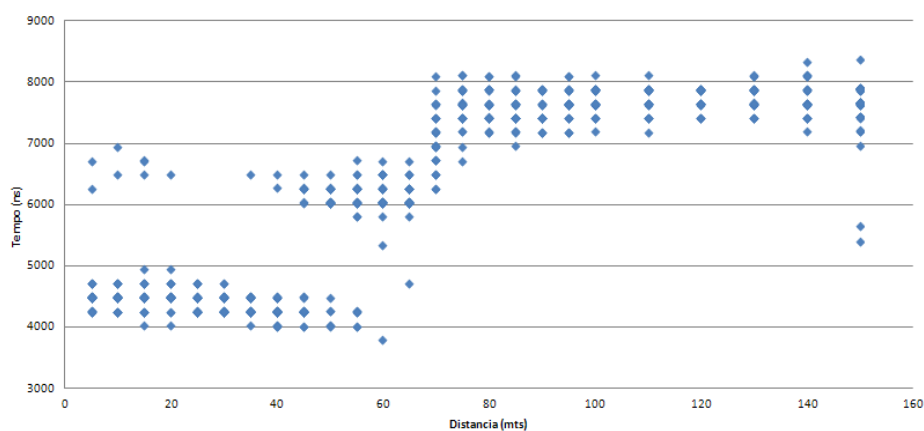


Figura 5.7 – Tempo de propagação do sinal detetada pela estação base 2, no ensaio nº 1.

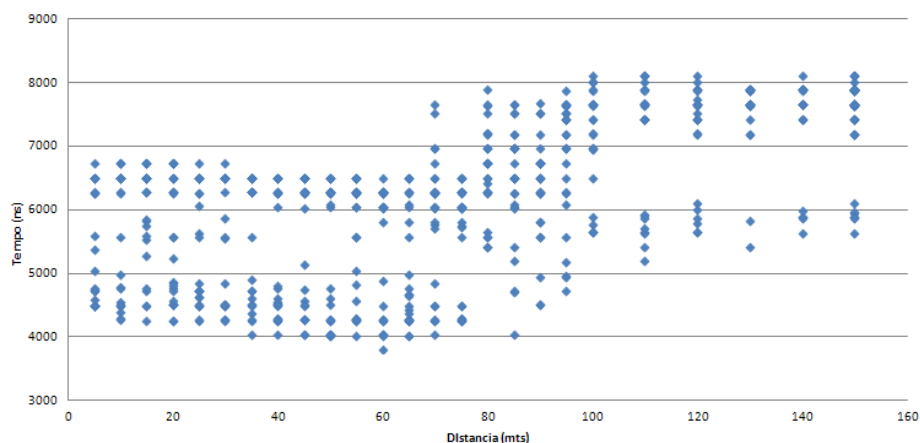


Figura 5.8 – Tempo de propagação do sinal detetada pela estação base 3, no ensaio nº 1.

Pelos gráficos acima representados (figuras 5.6 a 5.8), pode-se verificar a existência de dois patamares temporais, mas no entanto para o sistema proposto a técnica de medição da distância através do tempo de propagação do sinal, não oferece nenhuma valia que possa contribuir para a precisão na localização de um dispositivo móvel para o sistema proposto, provavelmente se as distâncias em jogo fossem na ordem dos quilómetros seria um bom contributo, pois os gráficos sugerem a existência de um patamar temporal a cada 100 metros.

Ensaio nº2 – No segundo ensaio, o objetivo foi determinar uma estimativa da função que relaciona o nível de potência do sinal recebido RSSI_ADC com a distância, numa área sem obstáculos laterais que possam gerar reflexões. Neste ensaio os testes foram efetuados com antenas certificadas de 2 dBi (antena 2dBi HELICAL SMA $\frac{1}{4}\lambda$ ANT-4HEL2 – SMA, do fabricante *RF Solution*), os dispositivos rádio foram configurados de acordo com as configurações do cenário nº2.

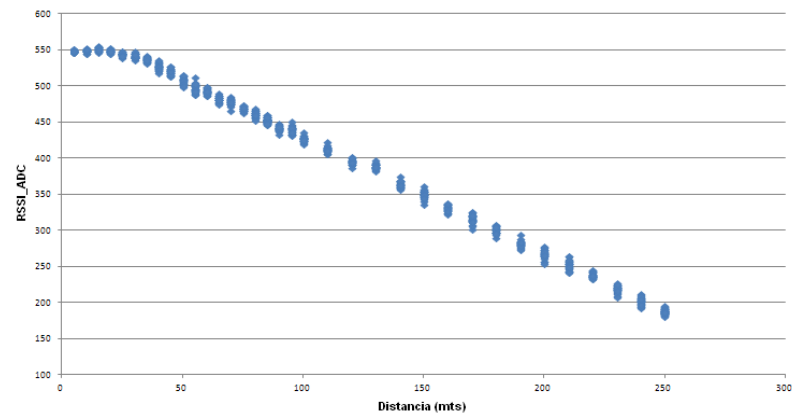


Figura 5.9 – Resultados obtidos pela estação base 1, no ensaio nº 2.

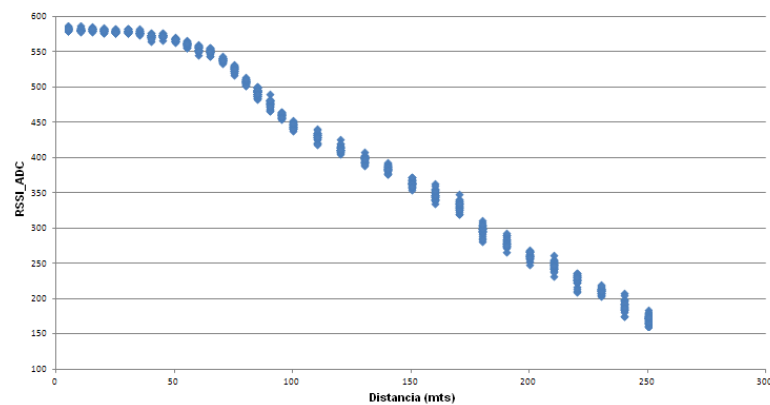


Figura 5.10 – Resultados obtidos pela estação base 2, no ensaio nº 2.

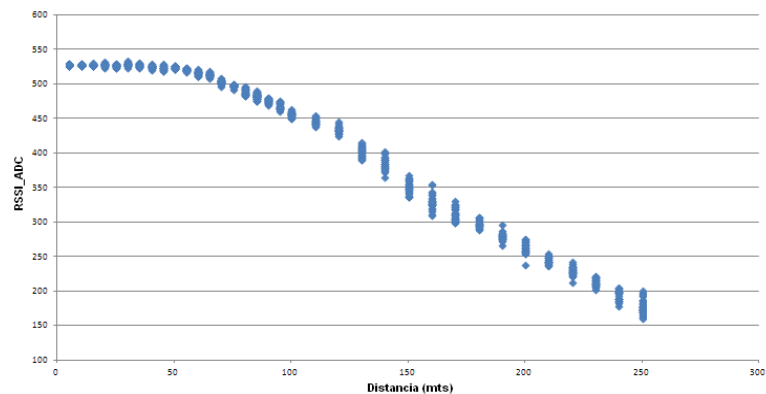


Figura 5.11 – Resultados obtidos pela estação base 3, no ensaio nº 2.

Pela análise dos dados obtidos no segundo ensaio, podemos verificar que a inexistência de obstáculos no cenário e o uso de uma antena certificada de 2 dBi, melhora significativamente o desempenho e/ou comportamento do sistema. As linhas de tendência obtidas pela análise dos gráficos no *Excel*, deram origem às funções que definem a distância em relação ao nível de potência do sinal recebido $RSSI_ADC$ expressões (87), (88) e (89).

$$d_{B1}(m) = 35.35 * (\sqrt{(1156 - RSSI_{ADC})} - 24.1) \quad (87)$$

$$d_{B2}(m) = 22.94 * (\sqrt{862 - RSSI_{ADC}} - 15.6) \quad (88)$$

$$d_{B2}(m) = 15.81 * (\sqrt{(573 - RSSI_{ADC})} - 4.7) \quad (89)$$

5.2 Validação do modelo do sistema proposto.

Nesta fase do projeto, pretende-se verificar a viabilidade do sistema de rádio localização proposto. A partir das funções que representam a distância em função do nível de potência do sinal recebido $RSSI_ADC$ e com recurso a ferramentas matemática de localização, pretende-se avaliar e melhorar o resultado obtido após um processo de rádio localização. Nos próximos quatro ensaios pretende-se avaliar o comportamento do sistema, considerando o dispositivo móvel numa posição fixa e em movimento.

Ensaio nº3 – No terceiro ensaio, o objetivo foi determinar uma estimativa da localização do dispositivo móvel em quatro posições pré-definidas, dentro da mesma área na qual foi realizado o ensaio nº1, o cenário 1. Pretende-se também neste ensaio, verificar e validar o algoritmo de localização baseado na lateração circular e o impacto da utilização de filtros na estimativa do resultado.

A metodologia utilizada para analisar e estimar a localização do dispositivo móvel seguiu os seguintes passos:

Aquisição no terreno das amostras relativas a cada uma das quatro posições pré-definidas. As amostras foram adquiridas durante um intervalo de tempo de dois minutos e os dados guardados na base de dados, é de referir que cada amostra contém aproximadamente 25 aquisições;

Através dos dados guardados na base de dados durante o ensaio, cada grupo de dados correspondentes a uma posição, foi analisado e estimada a localização.

A localização das quatro posições pré-definidas são as seguintes:

- P1 (55, 45);
- P2 (110, 10);
- P3 (130, 55);
- P4 (115, 80).

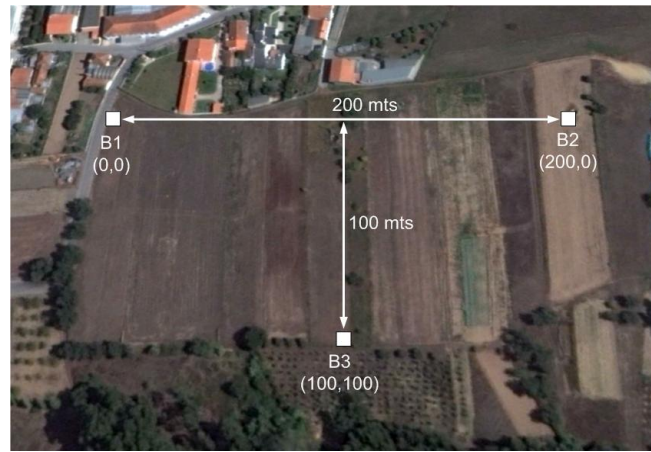


Figura 5.12 – Localização do ensaio nº 6 e das estações base.

Para estimar a localização de cada uma das quatro posições, recorreu-se a três técnicas de estimação para posterior comparação e análise. Numa primeira fase a estimativa da localização é realizada recorrendo à lateração circular cujo valor das distâncias é obtido a partir das expressões (84), (85) e (86).

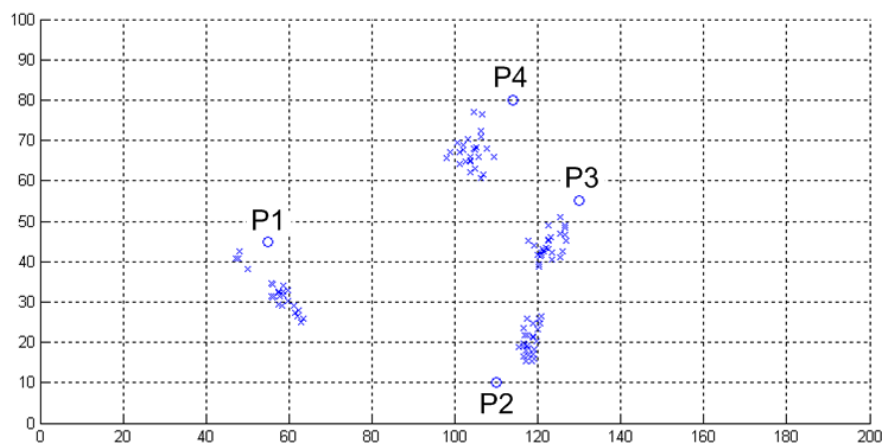


Figura 5.13 – Estimativa da localização sem a implementação de filtros, ensaio nº 3.

Da análise da figura 5.13, verifica-se que sem usar qualquer filtro os resultados são aceitáveis, o erro médio na localização é aproximadamente de cerca de 10 metros e o máximo de 20 metros. Verifica-se também que nenhuma das estimativas coincide com a posição real, o que provavelmente se deve à dificuldade em definir com exatidão as funções que relacionam a distância com o nível de potência do sinal recebido RSSI_ADC.

Numa segunda fase, a estimativa da localização recorre ao filtro de média ponderada. Na aquisição de um novo valor do nível de potência do sinal recebido RSSI_ADC, e com recurso a expressão (51) e aos parâmetros estatísticos média e desvio padrão obtidos pelo ensaio nº1, o novo valor da amostra será corrigido, tendo em consideração a probabilidade de se encontrar próximo do valor médio. A correção do novo valor é feita através da expressão (90). Com este filtro pretende-se minimizar os valores de potência que não se encontrem enquadrados com o padrão previsto.

$$RSSI_{ADC} = P(n) * RSSI_{ADC}(n) + (1 - P(n)) * RSSI_{ADC}(n - 1) \quad (90)$$

Em que:

P(n) – Probabilidade do acontecimento actual;

(n-1) – Acontecimento anterior;

Pela expressão (90), pretende-se dar um maior peso a valores de $RSSI_{ADC}$ que se encontrem próximos do valor médio, e um menor peso a valores mais afastados. Para valores mais afastados do valor médio, o resultado final é fortemente condicionado pelo resultado da amostra anterior. A ideia subjacente a este filtro é minimizar as grandes variações de $RSSI_{ADC}$.

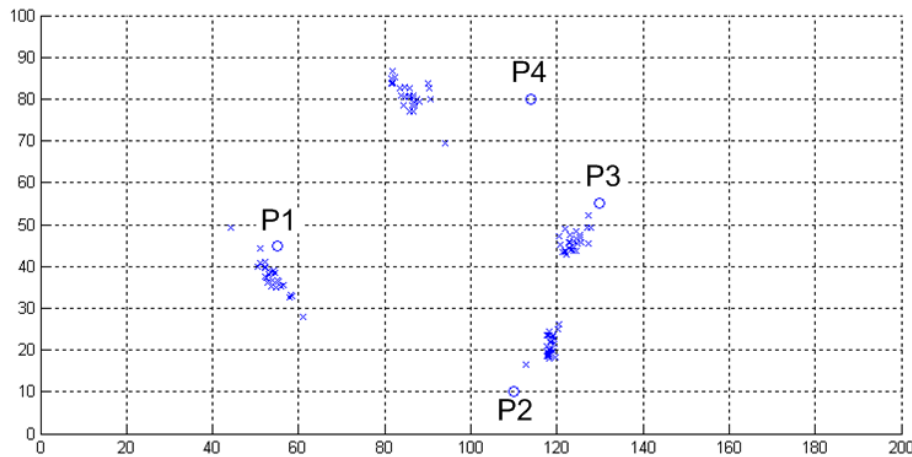


Figura 5.14 – Estimativa da localização recorrendo ao filtro de média ponderada, ensaio nº 3.

Da análise da figura 5.24, verifica-se que com recurso a este tipo de filtro, existe uma maior concentração das estimativas da localização, em relação às estimativas da localização sem filtro. No entanto, para a posição quatro o erro aumentou significativamente para cerca de 30 metros. Por último a estimativa da localização é realizado recorrendo ao filtro de partículas, em que o modelo do sistema são as expressões (84), (85) e (86).

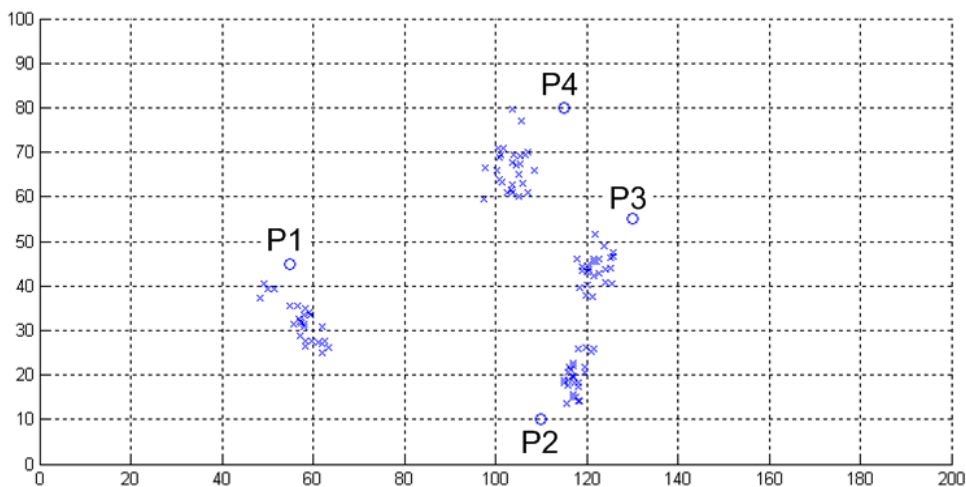


Figura 5.15 – Estimativa da localização com a implementação do filtro de partículas, ensaio nº 3.

Tabela 5.1 – Tabela com os resultados obtidos pelos três métodos, ensaio nº 3.

	Posição real (x,y)	Sem filtro			
		Valor médio	Erro		Desvio (Max - Min)
			Médio	Maximo	
P1	(55, 45)	(54,32)	13,04	21,93	25,04
P2	(110, 10)	(118,20)	12,81	18,87	12,77
P3	(130, 55)	(122,42)	15,26	20,00	15,27
P4	(115, 80)	(104,67)	17,03	25,00	19,35

	Posição real (x,y)	Filtro media ponderada			
		Valor médio	Erro		Desvio (Max - Min)
			Médio	Maximo	
P1	(55, 45)	(54,37)	8,06	20,25	27,02
P2	(110, 10)	(118,21)	13,60	18,87	11,40
P3	(130, 55)	(124,46)	10,82	15,62	12,04
P4	(115, 80)	(86,81)	29,02	35,74	22,20

	Posição real (x,y)	Filtro de partículas			
		Valor médio	Erro		Desvio (Max - Min)
			Médio	Maximo	
P1	(55, 45)	(58,27)	13,34	25,08	26,25
P2	(110, 10)	(118,20)	10,63	18,87	16,55
P3	(130, 55)	(121,43)	15,81	21,63	15,26
P4	(115, 80)	(104,67)	17,69	27,66	21,95

Com a implementação do filtro de partículas, podemos verificar que o resultado não é o esperado, o resultado esperado seria uma maior concentração das estimativas de localização de cada uma das aquisições, também se pode verificar que nenhuma das estimativas coincide com a posição real, sendo o erro médio máximo aproximadamente 23.31 metros. Da análise das três técnicas de estimação implementadas, verifica-se que a que apresenta melhores resultados é a técnica de estimação da localização com recurso ao filtro descrito pela expressão (90). No entanto, algumas reformulações no algoritmo de localização devem ser implementadas, de modo a que a estimativa da localização se aproxime o máximo possível da posição real.

Ensaio nº4 – No quarto ensaio, o objetivo compreendeu a determinação de uma estimativa da localização do dispositivo móvel em quatro posições pré-definidas, numa área sem obstáculos laterais, a área na qual foi efetuado o ensaio é a mesma utilizada no ensaio nº 2.

O principal objectivo deste ensaio é verificar o impacto da ausência de reflexões provocadas pelos obstáculos laterais, e o desempenho do sistema de rádio localização quando se utiliza antenas certificadas de 2 dBi nas estações base, em substituição das antenas feitas por fios. A metodologia utilizada neste ensaio para analisar e estimar a localização das posições pré-definidas, foi a mesma que foi utilizada no ensaio nº 3. Numa primeira fase foram adquiridos no terreno uma série de aquisições para cada um das posições pré-definidas, para posterior análise e estimação da localização.

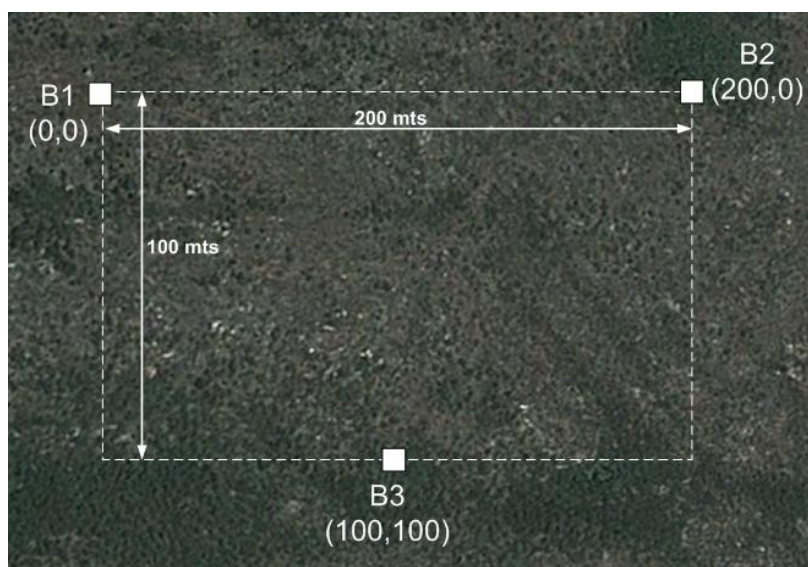


Figura 5.16 – Localização do ensaio nº 4 e das estações base.

A estimação da localização da posição, tal como acontece no ensaio nº 3, é realizada recorrendo a três técnicas de estimação: sem filtro, com filtro de média ponderada e um filtro de partículas. A estimativa da localização da posição sem a implementação de filtros é realizada recorrendo a lateração circular cujo valor das distâncias é obtido a partir das expressões (87), (88) e (89).

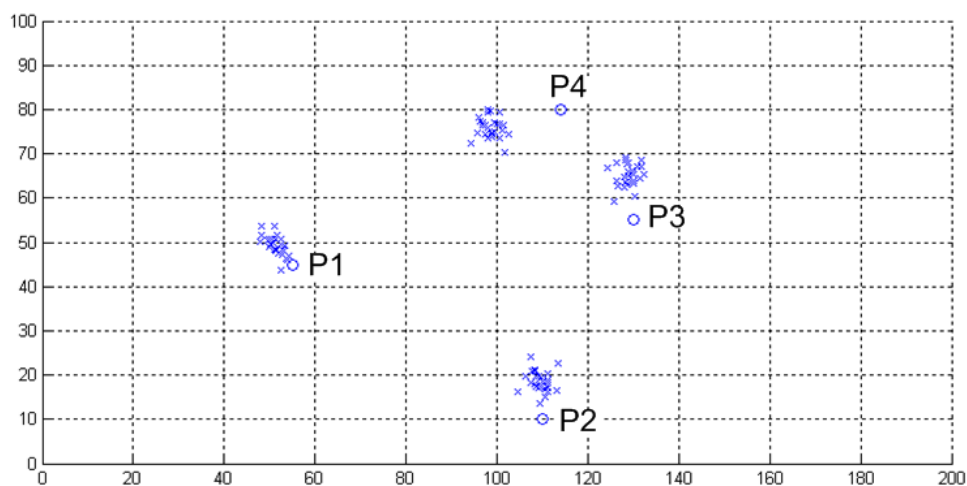


Figura 5.17 – Estimativa da localização sem a implementação de filtros, ensaio nº 4.

Pela análise da figura anterior e em comparação com o resultado obtido no ensaio nº 3, podemos verificar uma melhoria significativa na rádio localização, no que diz respeito à localização das posições pré-definidas. Nesta análise sem recurso a filtros, verifica-se uma maior concentração das estimativas para cada um das posições, sendo de salientar que o erro médio é inferior a dez metros. No entanto tal, como acontece no ensaio nº3, verifica-se também que nenhuma das estimativas coincide com a posição real, excepto para posição P1 para as quais algumas estimativas encontram-se muito próximas da posição real.

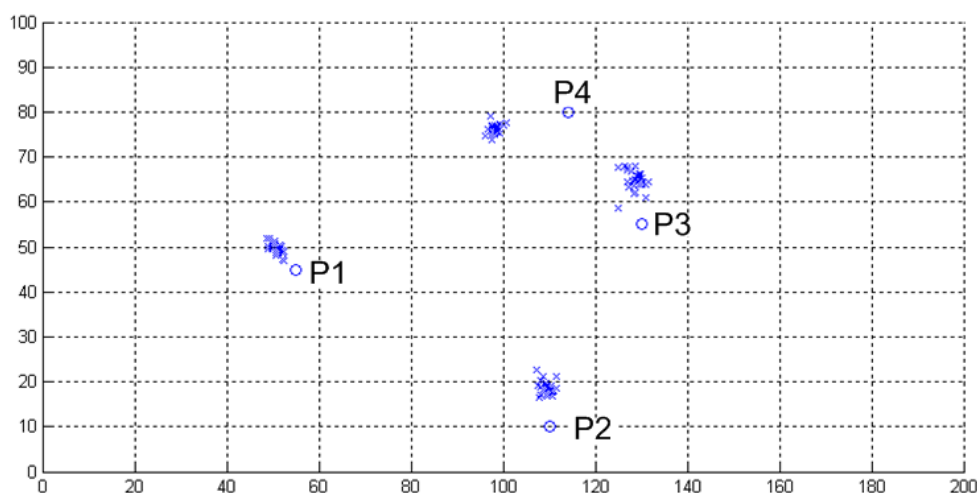


Figura 5.18 – Estimativa da localização com recurso ao filtro de média ponderada, ensaio nº4.

Comparando a estimativa da localização da posição sem o recurso a filtros, com resultado obtido no ensaio nº 3 para as mesmas condições, verifica-se uma maior concentração das estimativas, neste cenário sem obstáculos e com as novas antenas. É de salientar que o erro médio é aproximadamente inferior a dez metros.

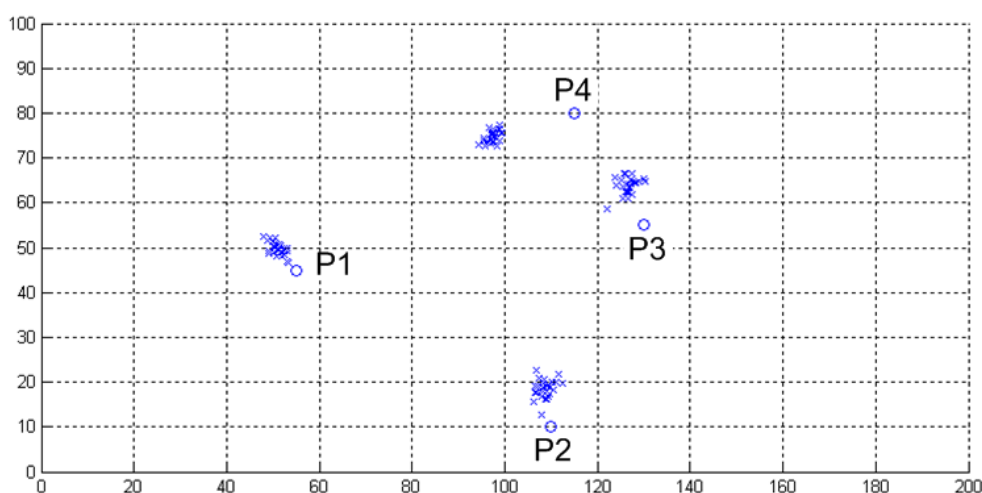


Figura 5.19 – Estimativa da localização com a implementação do filtro de partículas, ensaio nº 4.

Na implementação do filtro de partículas recorreu-se as expressões (87), (88) e (89), para definir o modelo do sistema. Comparando mais uma vez, os resultados obtidos em relação aos anteriores e ao resultado obtido no ensaio nº 3, verifica-se uma melhoria na concentração das estimativas para cada uma das posições pré-definidas e verifica-se claramente que o erro médio é aproximadamente de dez metros. Após a análise das três técnicas de estimação implementadas neste ensaio, a que apresenta melhores resultados é a técnica de estimação da localização da posição com recurso ao filtro de média ponderada, seguido do filtro de partículas, salientando que mais uma vez que a estimativa da localização da posição em nenhum dos casos coincide com a posição real, facto este que merece uma revisão do algoritmo implementado.

Tabela 5.2 – Tabela com os resultados obtidos pelos três métodos, ensaio nº 4.

	Posição real (x,y)	Sem filtro			
		Valor médio	Erro		Desvio (Max - Min)
			Médio	Maximo	
P1	(55, 45)	(51,50)	6,40	11,40	11,66
P2	(110, 10)	(109,18)	8,06	14,87	12,81
P3	(130, 55)	(129,65)	10,05	15,23	12,81
P4	(115, 80)	(99,76)	16,49	23,26	13,45

	Posição real (x,y)	Filtro media ponderada			
		Valor médio	Erro		Desvio (Max - Min)
			Médio	Maximo	
P1	(55, 45)	(51,50)	6,40	9,22	5,83
P2	(110, 10)	(109,19)	9,06	13,34	7,81
P3	(130, 55)	(129,65)	10,05	13,42	10,63
P4	(115, 80)	(98,76)	17,46	19,92	7,07

	Posição real (x,y)	Filtro de particulas			
		Valor médio	Erro		Desvio (Max - Min)
			Médio	Maximo	
P1	(55, 45)	(51,49)	5,66	9,22	8,94
P2	(110, 10)	(108,19)	9,22	15,56	10,77
P3	(130, 55)	(126,63)	8,94	13,60	10,63
P4	(115, 80)	(97,75)	18,68	24,04	10,00

Com a conclusão dos ensaios relativos à verificação do sistema de rádio localização para dispositivos móveis localizados em posições pré-definidas, podemos concluir que o sistema responde satisfatoriamente ao pretendido, em regra mesmo com obstáculos laterais no cenário considerado é possível com uma margem de erro aceitável, determinar uma boa estimativa da localização da posição dos dispositivos móveis. O passo seguinte compreende a verificação do comportamento do sistema de rádio localização em cenários em que o dispositivo móvel se encontra em movimento, para o efeito foram efetuados dois ensaios para futura comparação de resultados e validação do sistema para dispositivos móveis em movimento.

Ensaio nº5 – No quinto ensaio, o objetivo foi determinar uma estimativa da localização do dispositivo móvel quando o mesmo se encontra em movimento, a área para o qual foi realizado o ensaio foi a mesma que foi utilizada no ensaio nº3. Neste ensaio o dispositivo móvel irá deslocar-se linearmente entre o ponto P5 (0,0) e P6 (200,100) a uma velocidade constante aproximadamente de 0.85 metros por segundo. Pretende-se também neste ensaio verificar o resultado gerado pela utilização de filtro de partículas, a metodologia de análise para estimar a posição do dispositivo móvel ao longo do trajecto, é a mesma que foi utilizada nos ensaios nº3 e nº4.

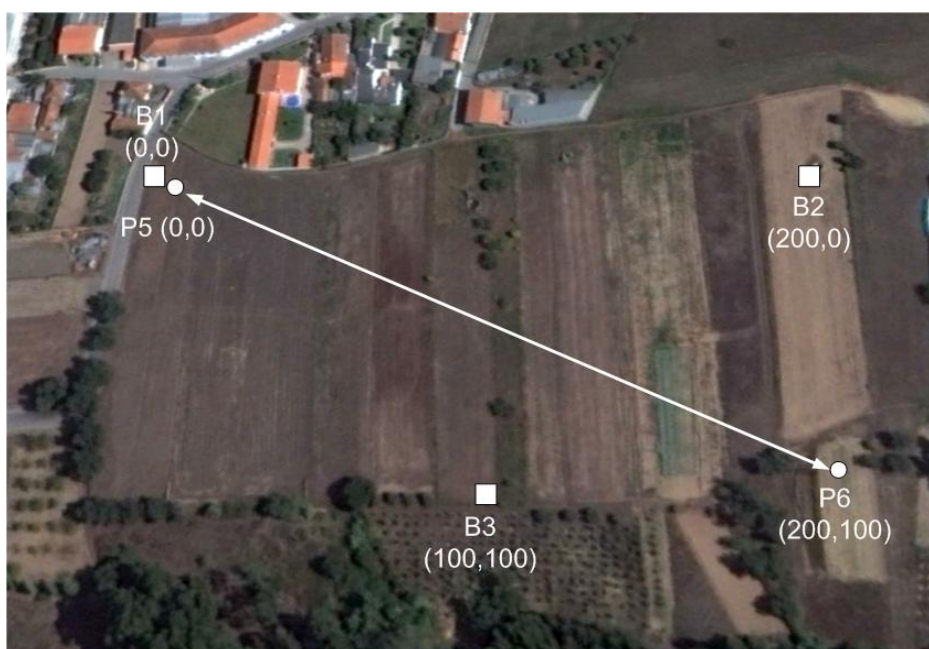


Figura 5.20 – Localização do ensaio nº 8 e das estações base.

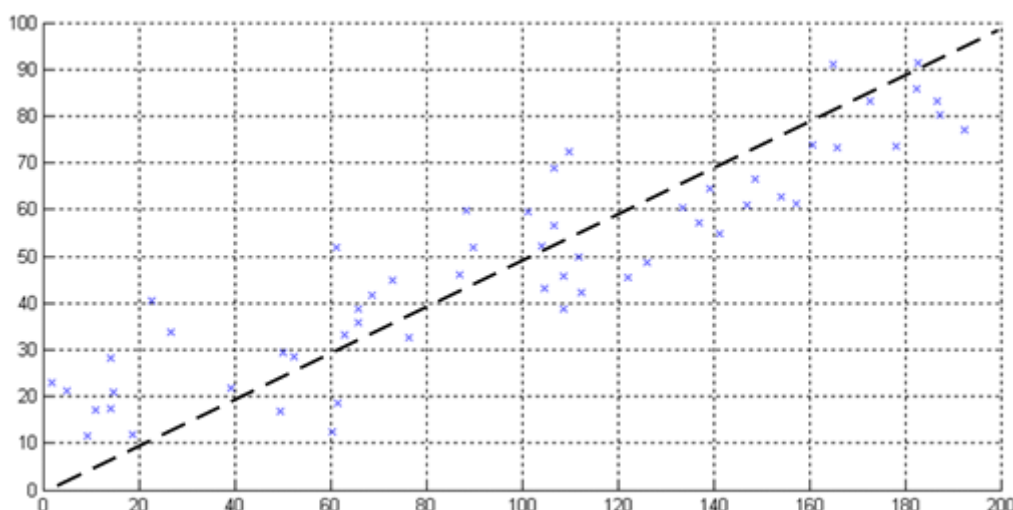


Figura 5.21 – Estimativa da localização sem a implementação de filtros, ensaio nº 5.

Da análise dos resultados presentes, na figura 5.21 verifica-se que a trajetória do dispositivo móvel entre os pontos P5 e P6 encontra-se de um certo modo definida, apesar de em certos casos o erro apresentado ser aproximadamente de trinta metros, torna-se evidente que estimar a localização da posição de um dispositivo móvel em movimento é um pouco mais complexo, do que estimar a localização da posição de um dispositivo móvel que se encontre fixo numa determinada posição, no entanto o resultado é aceitável, face aos objectivos propostos.

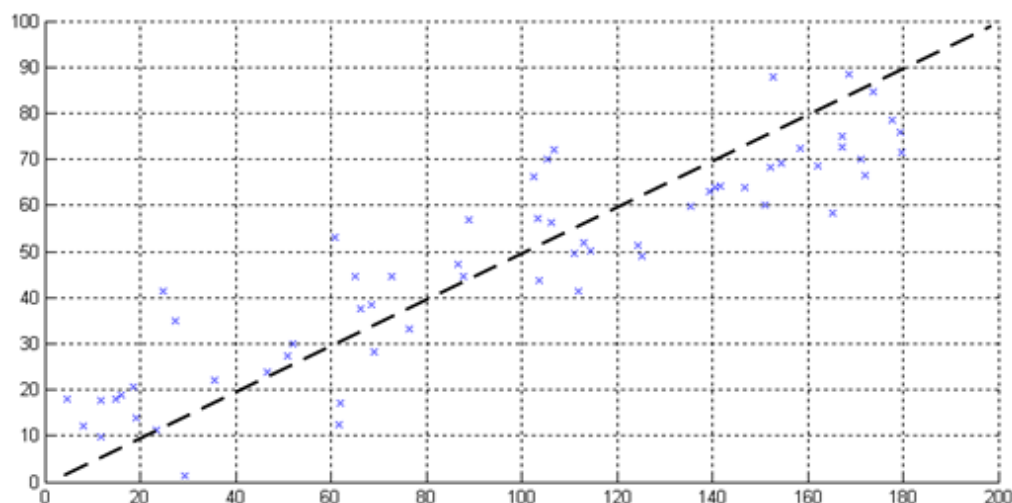


Figura 5.22 – Estimativa da localização com a implementação do filtro de partículas, ensaio nº 5.

A utilização do filtro de partículas, não produz nenhuma melhoria considerável no resultado final. Era esperado que a qualidade dos resultados finais da trajetória fosse muito próxima da obtida na utilização do filtro de partículas no caso estático, no entanto esse facto não se verifica. Repare-se que nos ensaios anteriores havia uma série de aquisições para a mesma posição, o que permitia comparar a aquisição actual com as aquisições anteriores, estimando assim a localização da próxima posição. Neste ensaio apenas existe uma única aquisição por posição, a inexistência de outros dados para comparação dificulta a determinação da estimativa da localização da posição, como se pode verificar nas últimas duas figuras.

Ensaio nº6 – No sexto ensaio, pretende-se verificar o desempenho do sistema de rádio localização, seguindo o mesmo método utilizado no ensaio nº5, mas numa área sem obstáculos laterais e com a utilização das antenas certificadas de 2 dBi. A área para o qual foi efetuado o ensaio é a mesma área utilizada no ensaio nº 4.

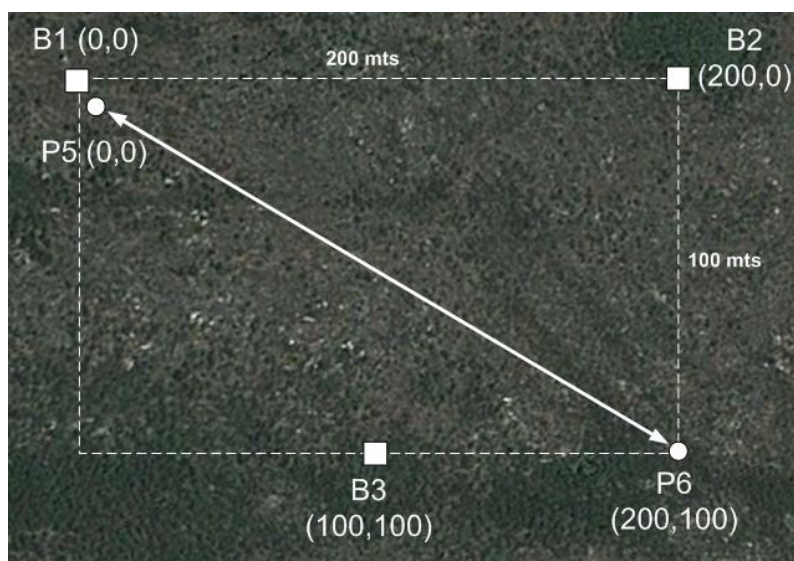


Figura 5.23 – Localização do ensaio nº 6 e das estações base.

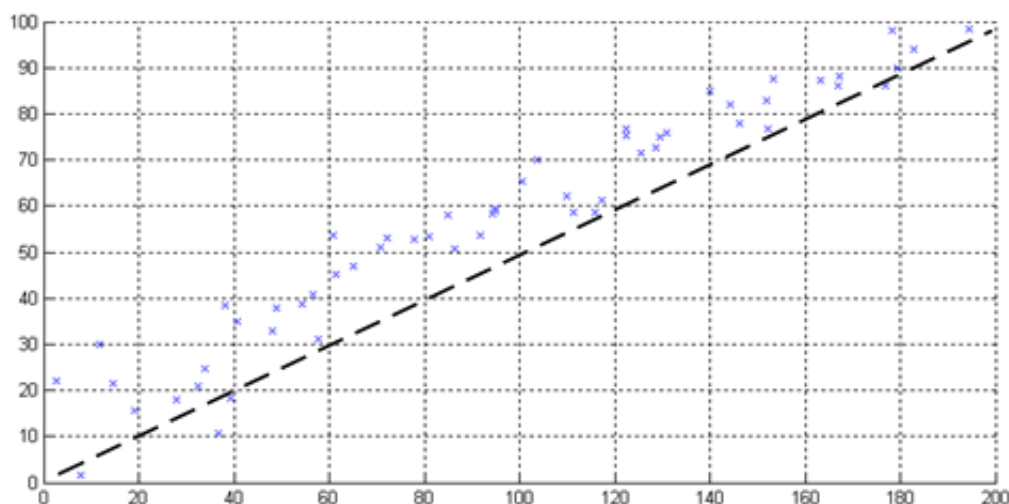


Figura 5.24 – Estimativa da localização sem a implementação de filtros, ensaio nº 6.

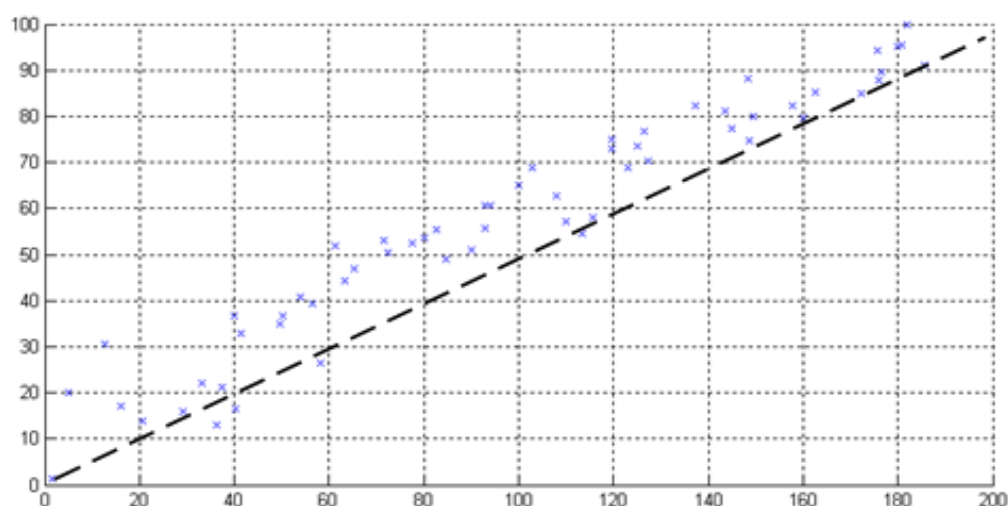


Figura 5.25 – Estimativa da localização com a implementação do filtro de partículas, ensaio nº 6.

Pelas análises feitas as duas figuras anteriores e comparando com o resultado obtido pelo ensaio nº 5, podemos verificar um melhor desempenho do sistema em cenários sem obstáculos laterais. O uso de antenas de melhor qualidade também contribui para a eficiência do sistema, neste ensaio verifica-se que o erro médio durante a trajetória é aproximadamente de dez metros. Tal como aconteceu no ensaio nº 4, a estimativa da localização da posição recorrendo ao filtro de partículas, pouco ou nada melhorou o desempenho do sistema.

5.3 Verificação e validação do *software* do sistema proposto.

O *software* desenvolvido para interagir com o sistema de rádio localização, tem como principal objetivo servir de interface entre o sistema e o utilizador final, nesta secção pretende-se verificar e validar os seguintes requisitos funcionais:

Escrita e leitura dos processos de localização na base de dados;

Eficiência do protocolo de comunicações implementado;

Monitorização em tempo real da localização de uma posição;

Monitorização da localização de uma posição, a partir da consulta dos dados guardados na base de dados.

O processo de escrita na base de dados e a verificação do protocolo de comunicação, pode ser verificado pelo conteúdo dos dados escritos na base de dados durante os processos de localização, caso os dados correspondam a valores esperados, podemos considerar como validado o processo de escrita na base de dados, e o protocolo de comunicações usado.

Carimbo_Temporal_Data	Carimbo_Temporal_Hora	ID_Destino	ID_Origem	RSSI_ADC	Numero_Mensagem	Tempo_Mensagem
26-05-2013	14:12:03	2	1638	582	88	4269
26-05-2013	14:12:03	3	1638	527	88	4491
26-05-2013	14:12:08	1	1638	548	89	6245
26-05-2013	14:12:08	2	1638	581	89	4717
26-05-2013	14:12:08	3	1638	530	89	4735
26-05-2013	14:12:12	1	1638	550	90	6257
26-05-2013	14:12:12	2	1638	581	90	4489
26-05-2013	14:12:12	3	1638	528	90	4503
26-05-2013	14:12:16	1	1638	553	91	6257
26-05-2013	14:12:16	2	1638	581	91	4489
26-05-2013	14:12:16	3	1638	526	91	6511
26-05-2013	14:12:21	1	1638	555	92	6245
26-05-2013	14:12:21	2	1638	580	92	4717
26-05-2013	14:12:21	3	1638	530	92	6507
26-05-2013	14:12:25	1	1638	550	93	6253
26-05-2013	14:12:25	2	1638	581	93	4729
26-05-2013	14:12:25	3	1638	530	93	6739
26-05-2013	14:12:29	1	1638	551	94	6245
26-05-2013	14:12:29	2	1638	584	94	4485
26-05-2013	14:12:29	3	1638	530	94	6507
26-05-2013	14:12:34	1	1638	552	95	6253
26-05-2013	14:12:34	2	1638	584	95	4501
26-05-2013	14:12:34	3	1638	526	95	4739
26-05-2013	14:12:38	1	1638	554	96	6257
26-05-2013	14:12:38	2	1638	583	96	4717
26-05-2013	14:12:38	3	1638	527	96	5607
26-05-2013	14:12:42	1	1638	554	97	6257
26-05-2013	14:12:42	2	1638	584	97	4497
26-05-2013	14:12:43	3	1638	528	97	4623

Figura 5.26 – Conjunto de dados escritos na base de dados, durante o ensaio nº 4.

De acordo com a figura anterior, podemos verificar que o processo de escrita na base de dados corresponde ao esperado. Num determinado instante de tempo, as estações base envolvidas no sistema, enviam de modo sequencial os dados obtidos durante um processo de localização para a unidade central de processamento de dados, que por sua vez os guarda numa base de dados.

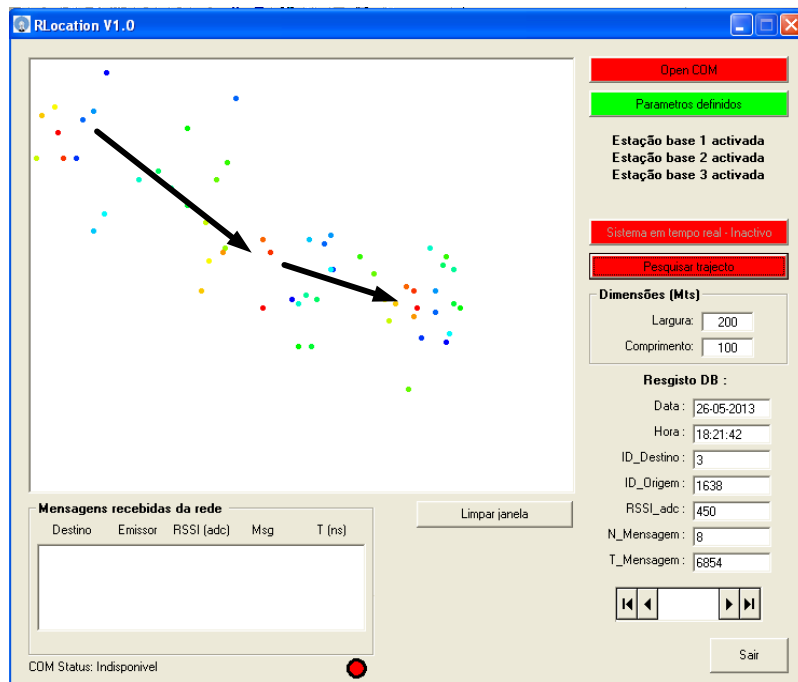


Figura 5.27 – Monitorização da trajetória do dispositivo móvel, durante o ensaio n° 5.

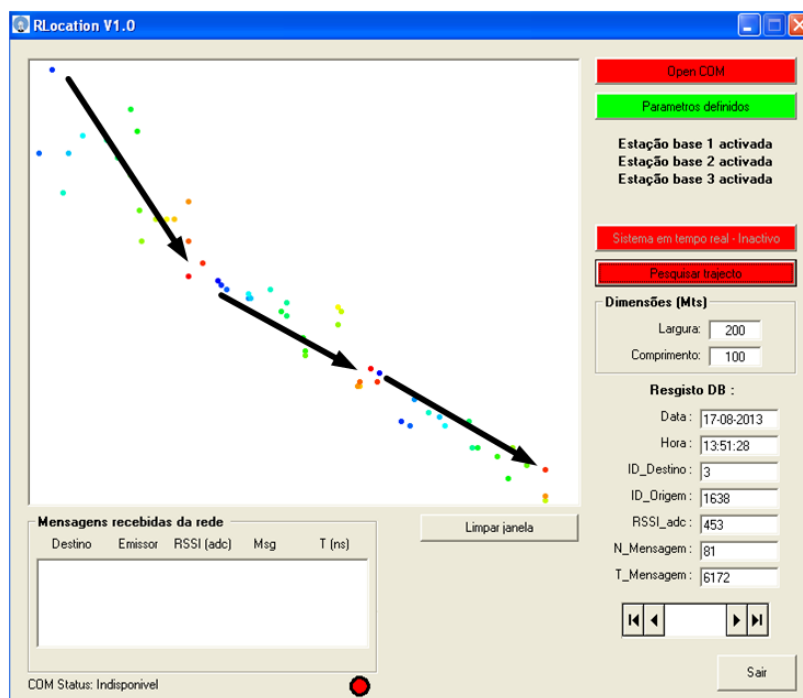


Figura 5.28 – Monitorização da trajetória do dispositivo móvel, durante o ensaio n° 6.

Pela análise das figuras anteriores, é perceptível a trajetória do dispositivo móvel em ambos os ensaios, saliento que a trajetória pode ser verificada na interface gráfica através da cor dos pontos definidos pelas estimativas da localização das posições, em que o sentido da trajetória muda da cor azul para a cor vermelha. Tal como era esperado a trajetória definida pelo ensaio n°5 apresenta melhores resultados que o ensaio n°4, recorde que no ensaio n° 5 foram utilizadas antenas de 2 dBi nas estações base e o cenário não apresenta obstáculos laterais, tais

como árvores e casas. Outro facto a salientar, é a dificuldade em relacionar a distância em função do RSSI_ADC a menos de cinquenta metros de uma estação base, o que terá o seu impacto na estimativa da localização da posição. Para distâncias entre os cinquenta e duzentos e cinquenta metros verificamos que a relação entre a distância e o valor do RSSI_ADC é praticamente linear, como se ilustra na figura seguinte.

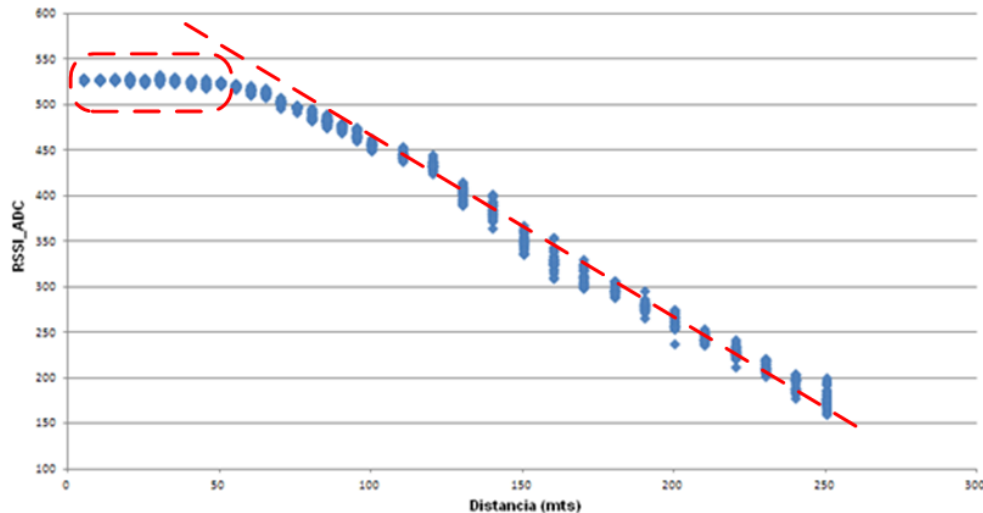


Figura 5.29 – Região linear da relação entre a distância e o **RSSI_ADC**.

Esse facto já foi anteriormente analisado e deriva da variação monotónica decrescente após a distância crítica. Verifica-se que para pequenas distâncias o valor da potência recebida apresenta variações e desvanecimentos profundos.

5.4 Conclusão

O capítulo acima apresentado descreve, os resultados experimentais obtidos. Numa primeira fase verifica-se o bom funcionamento da *hardware* proposto, mas também o desempenho do protocolo de comunicações. Neste capítulo e em sintonia com os capítulos 2 e 3, consegue-se obter experimentalmente o modelo de propagação de sinais rádio, que permitiu implementar com sucesso o sistema de localização proposto.

No capítulo é efectuada a avaliação do sistema em dois cenários distintos quanto ao desempenho dos três métodos implementados, para a localização do dispositivo móvel. Chegando-se à conclusão que a principal barreira, compreende a relação com alguma exatidão entre o nível de potência do sinal recebido RSSI com a distância. Os filtros implementados mostraram uma melhoria no desempenho do sistema de rádio localização, em relação ao sistema sem filtros.

O capítulo descreve também, o impacto causado no desempenho do sistema, pela existência de reflexões provocadas por obstáculos, na propagação dos sinais rádio, tal como foi previsto no capítulo 2.

6 Conclusões

6.1 Principais Conclusões

Após a conclusão do presente projecto, conclui-se que é possível implementar um sistema de rádio localização para dispositivos móveis em movimento, baseado em medidas do nível de potência do sinal recebido. Dos resultados obtidos experimentalmente na determinação localização do dispositivo móvel, verificou-se que o erro da localização é inferior a 10 metros.

Da análise das diferentes técnicas de localização, verifica-se que a que melhor se enquadra neste sistema é a lateração circular. Contudo para esta técnica verifica-se que o diagrama de radiação das antenas nas estações base deve ser omnidirecional no plano horizontal, ou deve ter um dado ângulo de abertura considerável dentro do qual o nível de potência é aproximadamente constante (caso das antenas cardioide). Caso contrário numa direção iremos ter uma relação da distância em função do nível de potência do sinal recebido e noutra direção iremos obter outra relação, o que coloca em causa a eficácia do sistema.

Quanto ao tratamento dos dados recebidos num processo de localização, verifica-se que o resultado final pode ser melhorado com recurso a filtros. No entanto também se constata que o tratamento dos dados sem o recurso a filtros apresenta um resultado de algum modo satisfatório, como se pode verificar nos ensaios nº 3 e nº 4. Os filtros analisados, foram o filtro de partículas e o filtro de média ponderada. Considerou-se também dois modos distintos para análise do sistema, estático e dinâmico. Para o modo estático, que consiste na estimativa da localização da posição do dispositivo móvel numa posição fixa (ensaios nº 3 e 4), verifica-se o filtro de média ponderada é o que apresenta melhores resultados. Por outro lado para o modo dinâmico, que consiste na estimativa da localização da posição do dispositivo móvel, quando o mesmo se encontra em movimento (ensaios nº 5 e 6), verifica-se que não é possível aplicar o filtro de média ponderada do mesmo modo como é aplicado no modo estático, no entanto é possível melhorar o resultado final impondo condições, por exemplo, não permitindo deslocamentos que à partida sejam irrealistas.

Um facto importante a salientar, é que durante o desenvolvimento do projeto, mais propriamente na fase de verificação de resultados, verifica-se que o sistema apresenta melhores resultados quando lidamos com o valor do RSSI na sua forma original, isto é, sem converter o valor do RSSI que é obtido pelo ADC do microcontrolador em dBm. Verifica-se experimentalmente que o valor de transição das equações da expressão (80) não é exatamente igual em todos os dispositivos rádio, o que originava erros que comprometiam o resultado final. Quanto ao hardware, protocolo de comunicações e rede de estações base implementado, conclui-se que estas responderam de modo eficiente ao pretendido, sendo de destacar que o sistema é mais eficiente em cenários onde as reflexões de sinal e o multipercurso são mínimos.

É de salientar a contribuição do software desenvolvido, pois permitiu através da base de dados a possibilidade de se obter várias aquisições, para posterior análise e aperfeiçoamento do sistema.

6.2 Trabalhos futuros

Este projeto apresenta um sistema de rádio localização baseado na medição do nível de potência do sinal recebido RSSI, o qual se pretendeu validar o conceito com a utilização de apenas um dispositivo móvel e três estações base de referência. Na tentativa de melhorar a eficiência do sistema, identifiquei as seguintes melhorias que poderiam ser analisadas e implementadas:

Melhorar o algoritmo de localização, visto que experimentalmente verifica-se que os resultados das estimativas concentram-se num ponto, mas não em redor da posição real, como seria desejado.

Melhorar o algoritmo de localização, em cenários cujas reflexões do sinal e a propagação multipercurso tenham grande impacto no resultado final.

Implementação de uma técnica de acesso a rede sem fios, que permita que o sistema suporte um grande número de dispositivos móveis.

Verificação do desempenho do sistema, em função do aumento do número das estações base de referência.

Aperfeiçoar a técnica de medição do tempo de propagação do sinal rádio em espaço livre, por consequência reforçar o valor do resultado final com o uso desta nova variável.

Melhorar a eficiência energética dos dispositivos móveis.

7 Referências

LIVROS DE ORIENTAÇÃO FUNDAMENTAL

- [1] CARLSON, A. Bruce, “Communication Systems”, 3º Edição, MC-Graw Hill, 1986.
- [2] MEDEIROS, Júlio Cesar de Oliveira, “Princípios de Telecomunicações”, 2º Edição, Érica, 2007.
- [3] GOMES, Alcides Tadeu, “Telecomunicações Transmissão e Recepção”, 21ª Edição, Érica, 2007.
- [4] SKLAR, Bernard, “Digital Communication Fundamentals and Applications”, Second Edition, Prentice Hall, 2001.
- [5] HAYKIN, Simon and Barry Van Venn, “Sinais e Sistemas” - Capítulo 5, 1º Edição, BookMan, 2001.
- [6] COUCH II, Leon W., “Digital and Analog Communication Systems” – Capítulo 5, 5º Edição, Prentice Hall, 1997.
- [7] REIS, Elizabeth, et al, “Estatística Aplicada Vol. 1 e 2”, 5º Edição, Edições Silabo, 2007.
- [8] FIDALGO, Carla, “Álgebra Linear”, ISEC, 2004.
- [9] FERREIRA, Manuel Alberto M., Isabel Amaral, “Matemática Álgebra Linear Vol. 1”, 6º Edição, Edições Silabo, 2002.
- [10] PEREIRA, Fabio, “Microcontrolar PIC18 Detalhado”, 1º Edição, Érica, 2010.
- [11] TRANTER, William H., et al, “Principles of Communication System Simulation with Wireless Application”, 1º Edição, Prentice Hall, 2003.

DISSERTAÇÕES E TESES

- [12] MATOS, Rui Filipe Freitas, “Sistemas de localização com base em tecnologias sem fios”, Universidade de Aveiro, 2010.
- [13] FERREIRA, David de Esteves Pereira e Matos, “Sistemas de localização de radiofrequência”, Universidade do Minho, 2007.
- [14] PRATA, Pedro Isidoro, “Sistemas de localização para ambientes interiores baseados em RFID”, Universidade de Aveiro, 2008.
- [15] OLIVEIRA, Luis Filipe Nunes Quaresma, “Navegação em robôs móveis baseado em comunicação RF AD-HOC”, Universidade de Aveiro, 2009.
- [16] PINTO, Ana Flávia Cupertino, “Filtro de partículas: O Algoritmo Resample-Move”, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [17] MOURA, André Iasi, “WBLS: Um sistema de localização de dispositivos móveis em redes Wi-Fi”, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- [18] LIMA, Eliomar Araújo, “Sistemas para localização de pessoas e objectos em ambientes indoor”, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2001.
- [19] COUTO, Miguel Simas da Costa, “Localização e navegação entre robôs móveis”, Instituto Superior Técnico, 2010.
- [20] CAVALGANTE, Gustavo Araújo, “Otimização de modelos de predição da perda de propagação aplicáveis em 3.5 GHz utilizando algoritmos genéticos”, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- [21] OLIVEIRA, José Eduardo Gomes, “Correção de interferência eletromagnética em sistemas de localização”, Universidade de Aveiro, 2008.
- [22] LEE, Jeong Heon, “Physical Layer Security for Wireless Position in the Presence of Location Spoofing”, Virginia Polytechnic Institute, 2011.
- [23] PEREIRA, Esequiel da Veiga, “Desenvolvimento de um sistema de localização de fontes rádio frequência para aplicações indoor” (versão provisória), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [24] BAPTISTA, Manuel Carlos Pereira, “Identificação e caracterização da modulação dos sinais digitais em RF”, Universidade de Aveiro, 2008.
- [25] PINTO, Hugo Tiago Gonçalves, “Desenvolvimento de modelos de localização para tecnologias de redes sem fios”, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

-
- [26] BENSON, Bridget, "Design of Low-cost Underwater Acoustic Modem for Short-Range Sensor Networking Applications", University of California, San Diego, 2010.
- [27] CORREIA, Sergio Duarte, "Sistemas de localização em ambientes interior com medição de RSSI", Universidade de Coimbra, 2013.
- [28] HEIEN, Farlei José, "Sistemas de controlo híbrido para robôs móveis autónomos", Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2002.
- [29] PIMENTEL, Gustavo Gama da Rocha, "Aplicação do filtro de partículas como sistema de fusão de informação", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [30] MONTEIRO, João Filipe Gonçalves, "Estimadores de máxima verosimilhança para combinação captura – recaptura e trajectos lineares e as suas propriedades", Universidade de Évora, 2001.
- [31] MASIERO, Riccardo, "RSSI based tracking algorithms for wireless sensor networks: Theoretical aspects and performance evaluation", 2007.

TEXTOS DE APOIO

- [32] Apontamentos da disciplina "Comunicação Analógica e Digital", ISEC, 2010.
- [33] Apontamentos da disciplina "Propagação e Antenas", ISEC, 2010.
- [34] Apontamentos da disciplina "Sistemas de Telecomunicações", ISEC, 2010.
- [35] Apontamentos da disciplina "Comunicações Sem Fios e Mobilidade", ISEC, 2011.
- [36] TORRES, José Manuel "Apontamentos de Programação em Visual Basic", Universidade Fernando Pessoa, 2005.
- [37] SANTOS, Roberto Bairros, "Antenas".
- [38] AZEVEDO, Paulo, "Manual de Antenas, Propagação e Linhas de Transmissão", Centro de Formação Profissional da Indústria Eletrónica, 2007.
- [39] SOARES, António José Martins e Franklin da Costa Silva, "Antenas e Propagação", Universidade de Brasília, 2003.
- [40] MINOR, Bryan, "Particle Filters", 2011.
- [41] LEITÃO, Mario Jorge, "Redes de Comunicação Móvel".

- [42] HUANG, Han-WAY, “The PIC18 Microcontroller – Timers and CCP Modules”, Minnesota State University, Mankato, 2005.
- [43] DOUCET, Arnaud e Adam M. Johansen, “A Tutorial on Particle Filtering and Smoothing: Fifteen years later”, The Institute of Statistical Mathematics e University of Warwick, 2008.
- [44] SANTOS, Carlos Henriques Farias dos, “Teoria e Pratica do Filtro de Kalman”, Universidade Estadual do Oeste do Paraná,
- [45] CAETANO, Marco Antonio Leonel, “Filtro de Kalman – Teoria e aplicação para iniciantes”.
- [46] MACHADO, Ademir Freitas, “Manual das antenas”, 2012.
- [47] AGUIR, Mauricio, “Monte Carlo em Estimativas de Software”, Metricas.
- [48] PFEIFFER, Michael, “A brief introduction to particle filters”, 2004.
- [49] LATECKI, Longin Jan, “Tutorial on Particle Filters”, Temple University.
- [50] Apontamentos da disciplina “Sistemas de Telecomunicações II – Elementos de propagação e métodos de planeamento”, ISEL.
- [51] Apontamentos da disciplina “Propagação II – Influencia da Atmosfera”, ISEL.
- [52] Apontamentos da disciplina “Propagação II – Canal Rádio e Desvanecimento”, ISEL.
- [53] Apontamentos da disciplina “Propagação II – Distribuições Estatísticas em Propagação na Atmosfera”, ISEL.
- [54] Apontamentos da disciplina “Propagação II – Elipsoides de Fresnel”, ISEL.
- [55] Apontamentos da disciplina “Propagação II – Modelos de Propagação para Comunicações Móveis”, ISEL.
- [56] Apontamentos da disciplina “Propagação II – Propagação”, ISEL.
- [57] Apontamentos da disciplina “Propagação II – Reflexões no Solo”, ISEL.
- [58] Apontamentos da disciplina “Propagação II – Influencias do Terreno”, ISEL.
- [59] FIALHO, Vítor Manuel de Oliveira, “Apontamentos sobre Modulações Digitais”, ISEL, 2010.

ARTIGOS

- [60] LEE, Kung Chung, et al, “A Comparison between Unscented Kalman Filtering and Particle Filtering for RSSI-Based Tracking”, University of British Columbia, Vancouver, Canada and Dresden University of Technology German, 2010 IEEE.
- [61] TANG, Chengpei and Jian Yin, “A Localization Algorithm of Weighted Maximum Likelihood Estimation for Wireless Sensor Network”, Sun Yat-sen University, Guangzhou, China, Journal of Information & Computational Science 8:16, 2011.
- [62] SILVA, David Figueiredo, “Filtragem estocástica aplicada a sistemas Max_Plux lineares”, DCA, FEEC, UNICAMP, Sem data de publicação.
- [63] CHAN, Yio-Tong, et al, “Exact and approximate Maximum Likelihood Localization Algorithms”, IEEE VOL 55 N° 1 January 2006.
- [64] ROMERO, Victor, et al, “Tutorial sobre o filtro de partículas aplicado em localização de robôs móveis”, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, sem data de publicação.
- [65] SAVIC, Vladimir, et al, “Particle filtering for indoor RFID tag tracking”, Linkoping University Post Print, 2011 IEEE.
- [66] FERREIRA, Luiz Henrique Monteiro, “Comparação de desempenho entre FKE e Filtro de Partículas usando modelos não lineares”, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Sp Brasil, sem data de publicação.
- [67] ZHANG, Xiaoqin, et al, “A Smarter Particle Filter”, Institute of Automation, Beijing, China and School of Computer Science and Information Systems, Birkbeck Colleg, London, UK, sem data de publicação.
- [68] HSIAO, Kaijen, et al, “Particle Filters and Their Application”, Cognitive Robotics, 2005.
- [69] EL-OSERY, Aly I., et al, “Calibration-Free RF-Based Localization Algorithm for Sensor Actuator Networks using Particle Filters”, IEEE, sem data de publicação.
- [70] MASKELL, Simon, Neil Gordon “A Tutorial on Particle Filter for On-Line Nonlinear / Non-Gaussian Bayesian Tracking”, Qinetiq Ltd and Cambridge University Engineering Department, UK, September 2001.
- [71] GARCIA, Cristina P., “Sistema de Localização Indoor e Outdoor”, Fev, 2009.
- [72] XIAO, Fu, et al, “Novel Node Localization Algorithm Based on Nonlinear Weighting Least Square for Wireless Sensor Networks”, School of Computer, Nanjing University of Post and Telecommunication, Nanjing, China, October, 2012.

- [73] GOODRICH, Michael A. , "A Tutorial on Simple Particle Filter", October, 2006.
- [74] SANTOS, Francisco Cláudio Abreu, "Introdução ao Filtro de Partículas", sem data de publicação.
- [75] YORIYAZ, Helio, "Método de Monte Carlo: Princípios e aplicações em Física Medica", Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Revista Brasileira de Física Medica, SP, Brasil, 2009.
- [76] REKLEITIS, Ioannis M. , "A Particle Filter Tutorial for Mobile Robot Localization", Centre for Intelligent Machines, McGill University, Montreal, Québec, Canada, sem data de publicação.
- [77] SANTOS, Antonio Jose Duarte, et al, "Localização de comboios via Radio", CP, NEC Portugal, Universidade de Aveiro, sem data de publicação.
- [78] SCHON, THOMAS B. , "Solving Nonlinear State Estimation Problems Using Particle Filter – Na Engineering Perspective", Division of Automatic Control, Linkoping University, May, 2010.
- [79] ORLANDE, H. R. B. , et al, "Kalman and Particle Filter", Sem data de publicação.
- [80] MYUNG, In Jae, "Tutorial on Maximum Likelihood Estimation", Departamento f Psychology, Ohio State University, Collumbus, USA, October, 2006.
- [81] TARRÍO, Paula, et al, "Weighted Least Squares Techniques for Improved Received Signal Strength Based Localization", Data Processing And Simulation Group, Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Telecomunicación, Spain, September 2011.

DATASHEETS

- [82] Microcontrolador PIC18F26K22, Microchip Technology Inc.
- [83] Transceiver Rádio MRF49XA, Microchip Technology Inc.
- [84] Aplication Note AN1552, Microchip Technology Inc.

NORMAS E LEGISLAÇÃO

- [85] Quadro nacional de atribuições de frequências, ICP-ANACOM, Edição 2009/2010.

8 ANEXO I

8.1 Estrutura comum do firmware

Configurações de hardware

```
#pragma config FOSC = HSMP           //Oscilador de media potencia entre 4 a 16 MHz
#pragma config PLLCFG = OFF           //Activa PLL directamente
#pragma config PRCLKEN = ON           //Clock primario controlado activado
#pragma config PWRTEN = ON            //Power up timer activado
#pragma config BOREN = SBORDIS        //Brown-out Reset activado apenas por hardware
#pragma config BORV = 190             //Nivel de Brown-out Reset
#pragma config PBAEN = OFF            //Apos reset os pinos PORTB<5:0> ficam configurados como IO digital
#pragma config HFOFST = ON            //Aguarda que o oscilador esteja estabilizado
#pragma config T3CMX = PORTC0         //T3CKI associado ao pino RC0
#pragma config P2BMX = PORTC0         //P2B associado ao pino RC0
#pragma config LVP = OFF              //Single-Supply ICSP desactivado
#pragma config MCLRE = INTMCLR        //Desactiva o pino 1 como MCLR
#pragma config DEBUG = ON              //Habilita a programação ICSP
#pragma config CPD = OFF              //Permite a leitura da EEPROM
#pragma config WRTD = OFF             //Permitir aescrita na EEPROM
```

Figura 8.1 – Configurações de *hardware* do microcontrolador.

Configuração do oscilador

```
void Config_OSC (void)
{
    #if defined (USE_FOSC_16MHZ)
        OSCTUNEbits.PLEN = 0;           //Desabilita o PLL
    #endif

    #if defined (USE_FOSC_64MHZ)
        OSCTUNEbits.PLEN = 1;           //Habilita o PLL
        while( OSCCON2bits.PLLRDY != 1); //Espera que o PLL estabilize
    #endif

    OSCCONbits.SCS = 0;                 //Origem do clock é o oscilador externo
}
```

Figura 8.2 – Função de configuração do oscilador.

Configuração TMR0 e TMR1

```
void Config_TMR0 (void)
{
    TOCONbits.TMR0ON = 0;               //Desabilita o TMR0
    TOCONbits.T08BIT = 0;               //Modo de 16 bits
    TOCONbits.T0CS = 0;                 //Origem do clock é ciclo de instrução FOSC/4

    TOCONbits.PSA = 1;                 //Prescaler activado
    TOCONbits.T0PS = 0;                 //Valor do prescaler
    TMR0H = 0xF0;                       //Inicia o TMR0 com valor 0xF060
    TMR0L = 0x60;                       //T = 25us

    INTCONbits.TMR0IE = 1;              //Habilita a interrupção do TMR0 por overflow
    INTCON2bits.TMR0IP = 1;             //Interrupção de TMR0 de baixa prioridade

    TOCONbits.TMR0ON = 1;               //Habilita o TMR0
}

void Config_TMR1 (void)
{
    T1CONbits.TMR1CS = 1;               //Origem do clock é ciclo de systema FOSC
    T1CONbits.T1CKPS = 0;               //Valor do prescaler = 1
    T1CONbits.T1SOSCEN = 0;             //Desabilita o oscilador secundario
    T1CONbits.T1RD16 = 1;               //Modo 16 bits

    TMR1H = 0x00;                       //Inicia o TMR1 com valor 0x0000
    TMR1L = 0x00;                       //T = 1ms

    PIE1bits.TMR1IE = 1;                //Habilita a interrupção do TMR1 por overflow
    IPR1bits.TMR1IP = 1;                //Interrupção de TMR1 de baixa prioridade

    T1GCONbits.TMR1GE = 0;              //Habilita o TMR1
    T1CONbits.TMR1ON = 1;
}
```

Figura 8.3 – Função de configuração e inicialização de *TMR0* e *TMR1*.

Configuração IO

```

void Config_IO (void)
{
    PINO_IO_0_OUTPUT;      //Configura o pino como output
    OUTPUT_0 = 0;          //Inicializa o pino com o valor logico LOW
    PINO_IO_1_OUTPUT;      //Configura o pino como output
    OUTPUT_1 = 0;          //Inicializa o pino com o valor logico LOW
    PINO_IO_2_OUTPUT;      //Configura o pino como output
    OUTPUT_2 = 0;          //Inicializa o pino com o valor logico LOW
}

```

Figura 8.4 – Função de configuração e inicialização dos IO.

Configuração ADC

```

void Config_ADC(void)
{
    VREFCON0 = 0b10100000;      //Configura a tensão positiva de referencia
                                //FRV = 2.048 V
    while(VREFCON0bits.FVRST == 0); //Espera que esteja activo

    TRISA0bits.TRISA0 = 1;      //Configura pino RA0 como entrada analogica
    ANSELAbits.ANSA0 = 1;      //Activa a função de entrada analogica

    ADCON0bits.ADON = 0;        //Desliga o ADC

    ADCON1 = 0b00001000;        //Configura com tensão de referencia FRV
    ADCON2 = 0b10101110;        //O resultado da conversão esta justificado a direita
                                //TAD = 12
                                //Clock = 600KHz
}

```

Figura 8.5 – Função de configuração e inicialização do ADC.

Configuração UART

```

void Config_UART(void)
{
    unsigned char i;

    UART_TX_TRIS = 0;
    UART_RX_TRIS = 1;

    ANSELAbits.ANSC6 = 0;      //Desliga a função ADC para os pinos RC6 e RC7
    ANSELAbits.ANSC7 = 0;

    TXSTA1bits.TX9 = 0;        //Modo 8 bits
    TXSTA1bits.TXEN = 1;      //Habilita o transmissor
    TXSTA1bits.SENDB = 0;

    RCSTA1bits.SPEN = 1;      //Configura pinos TX e RX como pinos UART
    RCSTA1bits.RX9 = 0;      //Modo 8 bits
    RCSTA1bits.CREN = 1;      //Habilita o receptor

    PIE1bits.RC1IE = 1;        //Habilita a interrupção
    IPR1bits.RC1IP = 1;        //Interrupção de prioridade alta

    BAUDCON1bits.DTRXP = 0;    //Rx é activo em nivel logico "0"
    BAUDCON1bits.CKTXP = 0;    //TX em estado logico "1" quando inactivo

    TXSTA1bits.SYNC = 0;        //Modo assincrono
    TXSTA1bits.BRGH = 1;        //Seleccção do baud rate alta velocidade
    BAUDCON1bits.BRG16 = 1;    //BRG no modo 16 bits
    BAUDCON1bits.ABDEN = 0;    //Auto baud rate desligado

    #if defined (USE_FOSC_16MHZ) //Baud rate a 115200 bps
        SPBRG1 = 34;           //Valor do gerador de BR 34, erro de 0.8%
        SPBRGH1 = 0;
    #endif

    #if defined (USE_FOSC_64MHZ)
        SPBRG1 = 138;          //Valor do gerador de BR 138, erro de 0.08%
        SPBRGH1 = 0;
    #endif
}

```

Figura 8.6 – Função de configuração e inicialização da UART.

Configuração SPI

```

void Config_SPI(void)
{
    SDO_TRIS = 0;           //Configura o pino SDO como output
    SDI_TRIS = 1;           //Configura o pino SDI como input
    SCK_TRIS = 0;           //Configura o pino SCK como output

    ANSELbits.ANSC3 = 0;    //Desliga a função ADC para os pinos RC3, RC4 e RC5
    ANSELbits.ANSC4 = 0;    //Configura o pino RC3 como digital IO
    ANSELbits.ANSC5 = 0;    //Configura o pino RC4 como digital IO
                           //Configura o pino RC5 como digital IO

    SSP1STAT = 0;           //Reinicia o registo de estado do SPI 1
    SSP1STATbits.SMP = 1;   //Amostragem na metade do ciclo do sinal
    SSP1STATbits.CKE = 1;   //SPI no modo 0

    SSPCON1 = 0;            //Reinicia o registo de controlo 1 do SPI 1

    #if defined (USE_FOSC_16MHZ)
        SSP1CON1bits.SSPM = 1; //SCK => Fosc/16 => 1Mbit
    #endif

    #if defined (USE_FOSC_64MHZ)
        SSP1CON1bits.SSPM = 2; //SCK => Fosc/64 => 1Mbit
    #endif

    SSP1CON1bits.SSPEN = 1; //Habilita o SPI
}

```

Figura 8.7 – Função de configuração e inicialização da *SPI*.**Configuração das interrupções**

```

void Config_INT(void)
{
    RCONbits.IPEN = 1;      //Habilita as prioridades nas interrupções
    INTCONbits.PEIE = 1;    //Habilita as interrupções de baixa prioridade
    INTCONbits.GIE = 1;     //Habilita as interrupções
}

void Inicia_INT(void)
{
    //Desabilita as todas as interrupções

    INTCONbits.GIE = 0;
    INTCONbits.TMR0IE = 0;
    INTCONbits.INT0IE = 0;
    INTCON3bits.INT2IE = 0;
    INTCON3bits.INT1IE = 0;
    INTCONbits.RBIE = 0;
    INTCON3bits.INT2IE = 0;
    INTCON3bits.INT1IE = 0;

    PIE1 = 0;
    PIE2 = 0;
    PIE3 = 0;
    PIE4 = 0;
    PIE5 = 0;
}

```

Figura 8.8 – Funções de configuração e inicialização das interrupções.

8.2 Configuração, inicialização, funcionamento do MRF49XA.

Definições MRF49XA		
#define CS_MRF49XA_TRIS		(TRISAbits.TRISA5)
#define CS_MRF49XA_OUTPUT		(CS_MRF49XA_TRIS = 0)
#define CS_MRF49XA		(LATAbits.LATA5)
#define CS_MRF49XA_High		(CS_MRF49XA = 1)
#define CS_MRF49XA_Low		(CS_MRF49XA = 0)
#define IRO_MRF49XA_TRIS		(TRISBbits.TRISB2)
#define IRO_MRF49XA_INPUT		(IRO_MRF49XA_TRIS = 1)
#define IRO_MRF49XA		(PORTBbits.RB2)
#define FSEL_MRF49XA_TRIS		(TRISBbits.TRISB3)
#define FSEL_MRF49XA_OUTPUT		(FSEL_MRF49XA_TRIS = 0)
#define FSEL_MRF49XA		(LATBbits.LATB3)
#define FSEL_MRF49XA_High		(FSEL_MRF49XA = 1)
#define FSEL_MRF49XA_Low		(FSEL_MRF49XA = 0)
#define FINT_MRF49XA_TRIS		(TRISBbits.TRISB4)
#define FINT_MRF49XA_INPUT		(FINT_MRF49XA_TRIS = 1)
#define FINT_MRF49XA		(PORTBbits.RB4)
#define RST_MRF49XA_TRIS		(TRISBbits.TRISB1)
#define RST_MRF49XA_OUTPUT		(RST_MRF49XA_TRIS = 0)
#define RST_MRF49XA		(LATBbits.LATB1)
#define RST_MRF49XA_High		(RST_MRF49XA = 1)
#define RST_MRF49XA_Low		(RST_MRF49XA = 0)
#define INT_MRF49XA_TRIS		(TRISBbits.TRISB0)
#define INT_MRF49XA_INPUT		(INT_MRF49XA_TRIS = 1)
#define INT_MRF49XA		(PORTBbits.RB0)
#define IRO_MRF49XA_IF		(INTCON3bits.INT2IF)
#define IRO_MRF49XA_IE		(INTCON3bits.INT2IE)
#define SDO_MRF49XA		(PORTCbits.RC4)
#define STSREG	0x0000	//Registo de estado
#define GENCREG	0x8000	//Registo de configuração geral
#define AFCCREG	0xC400	//Registo de configuração do controlo automatico da frequencia
#define TXCREG	0x9800	//Registo de configuração do transmissor
#define TXBREG	0xB800	//Registo de transmissão
#define CFSREG	0xA000	//Registo de configuração da frequencia central
#define RXCREG	0x9000	//Registo de configuração do receptor
#define BBFCREG	0xC228	//Registo de configuração da largura de banda
#define RXFIFOREG	0xB000	//Registo de de leitura da FIFO de recepção
#define FIFORSTREG	0xCA80	//Registo de configuração da FIFO
#define SYNREG	0xCE00	//Registo de configuração do byte de sincronização
#define DRSREG	0xC600	//Registo de configuração da taxa de transmissão
#define PMCREG	0x8200	//Registo de configuração da gestão de energia
#define WTSREG	0xE000	//Registo de configuração do Wake-Up timer
#define DCSREG	0xC800	//Registo de configuração do duty cycle
#define BCSREG	0xC000	//Registo de configuração de detecção de bateria fraca e CLK out
#define PLLCREG	0xCC02	//Registo de configuração do PLL

Figura 8.9 – Definições de *hardware* e registos do *transceiver* rádio MRF49XA.

Configuração e inicialização MRF49XA	
<pre>void Config_MRF49XA(void) { unsigned char k; for(k = 0 ; k < 6 ; k++) { Frame_RX_MRF49XA[k] = 0; //Inicializa buffer RX Frame_TX_MRF49XA[k] = 0; //Inicializa buffer TX } ID_Dispositivo_L = ID_Dispositivo & 0x00FF; ID_Dispositivo_H = ID_Dispositivo >> 8 & 0x00FF; ANSELAbits.ANSA5 = 0; //Pino CS MRF49XA CS_MRF49XA_OUTPUT; //Desliga a função ADC no pino RA5 //Configura o pino RA5 como output ANSELBbits.ANSB0 = 0; //Pino INT MRF49XA INT_MRF49XA_INPUT; //Desliga a função ADC no pino RB0 //Configura o pino RB0 como input ANSELBbits.ANSB1 = 0; //Pino RST MRF49XA RST_MRF49XA_OUTPUT; //Desliga a função ADC no pino RB1 //Configura o pino RB1 como output ANSELBbits.ANSB2 = 0; //Pino IRO MRF49XA IRO_MRF49XA_INPUT; //Desliga a função ADC no pino RB2 //Configura o pino RB2 como input ANSELBbits.ANSB3 = 0; //Pino FSEL MRF49XA FSEL_MRF49XA_OUTPUT; //Desliga a função ADC no pino RB3 //Configura o pino RB3 como output ANSELBbits.ANSB4 = 0; //Pino FINT MRF49XA FINT_MRF49XA_INPUT; //Desliga a função ADC no pino RB4 //Configura o pino RB4 como input }</pre>	

Figura 8.10 – Função de configuração e inicialização do *transceiver* rádio.

Configuração e inicialização MRF49XA

```

while( RST_MRF49XA == 0)
{
    RST_MRF49XA_High;           //Inicia o pino RST_MRF49XF como "1"
}

while( FSEL_MRF49XA == 0)
{
    FSEL_MRF49XA_High;          //Inicia o pino FSEL_MRF49XF como "1"
}

while( CS_MRF49XA == 0)
{
    CS_MRF49XA_High;            //Inicia o pino CS_MRF49XF como "1"
}

while( INT_MRF49XA == 0)
{
    INT_MRF49XA = 1;            //Inicia o pino INT_MRF49XA como "1"
}

while( LATBbits.LATB1 == 0)
{
    LATBbits.LATB1 = 1;
}

INTCON2bits.INTEDG2 = 0;        //Configura a interrupção IRO_MRF49XA na borda de descida

IRO_MRF49XA_IF = 0;             //Limpa a flag de interrupção IRO_MRF49XA
IRO_MRF49XA_IE = 0;            //Desabilita a interrupção IRO_MRF49XA

Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x01); //Configura e reinicia a FIFO como:
//Gera uma interrupção a cada 8 bits recebidos
//Desabilita o modo de reset quando VCC é menor que 0,2 V.

Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x03); //Configura FIFO como:
//Começa a preencher a FIFO quando recebe os caracteres de sincronismo

Config_Reg_MRF49XA(GENCREG | 0x5F);    //Registo de configuração geral
//Habilita a FIFO
//Selecciona a banda dos 433 MHz
//Configura os condensadores de acoplamento do Xtal como 16pF

Config_Reg_MRF49XA(AFCCREG | 0xF7);    //Registo de controlo automatico de frequencia
//O controlo automatico de frequencia é independente do estado do sinal DIO
//Seleccção da faixa de compensação de frequencia entre TX e RX +7.5 KHz a -10 KHz
//Seleccção do modo de controlo de frequencia de alta precisão
//Habilita adição da compensação de frequencia no PLL
//Habilita a compensação de frequencia

Config_Reg_MRF49XA(CFSREG | 0x0640);    //Definição da frequencia central para 434,24 MHz
Config_Reg_MRF49XA(DRSREG | 0x23);      //Definição da taxa de transmissão para 9579 bit's por segundo

Config_Reg_MRF49XA(PMCREG |
    PMCREG_DISCLKOUT);                  //Configuração da gestão de energia
//Clock out desligado

Config_Reg_MRF49XA(RXCREG |
    RXCREG_RXBW_67KHz |
    RXCREG_RXLNA_0dB |
    RXCREG_DRSSIT_97dB);                //Configuração do receptor, pino 16 configurado como INT
//Largura de banda do receptor
//Atenuação do LNA
//Threshold RSSI

Config_Reg_MRF49XA(TXCREG |
    TXBREG_MODBW_45KHz |
    TXBREG_TXPWR_0dB);                  //Configuração do transmissor
//Largura de banda do modelador
//Potencia do transmissor

Config_Reg_MRF49XA(PMCREG |
    PMCREG_DISCLKOUT |
    PMCREG_TXCEN);                      //Configuração da gestão de energia
//Clock out desligado
//Habilita o transmissor

Delay_ms(5);                            //Aguarda 5 milisegundos

Config_Reg_MRF49XA(PMCREG |
    PMCREG_DISCLKOUT |
    PMCREG_RXCEN);                      //Configuração da gestão de energia
//Clock out desligado
//Habilita o receptor, desabilita transmissor

Config_Reg_MRF49XA(GENCREG | 0x5F);    //Registo de configuração geral
//Habilita a FIFO
//Selecciona a banda dos 433 MHz
//Configura os condensadores de acoplamento do Xtal como 16pF

Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x01); //Configura e reinicia a FIFO como:
//Gera uma interrupção a cada 8 bits recebidos
//Desabilita o modo de reset quando VCC é menor que 0,2 V.

Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x03); //Configura FIFO como:
//Começa a preencher a FIFO quando recebe os caracteres de sincronismo

Config_Reg_MRF49XA(STSREG);             //Limpa as flags do registo de estado

IRO_MRF49XA_IE = 1;                    //Habilita a interrupção IRO_MRF49XA
}

```

Figura 8.11 – Função de configuração e inicialização do *transceiver* rádio - continuação.

Transmissão da mensagem

```

void MRF49XA_Carrega_Buffer_TX(void)
{
    Frame_TX_MRF49XA[0]= 0x2D;
    Frame_TX_MRF49XA[1]= 0xD4;

    //Carregar aqui o buffer TX "Frame_TX_MRF49XA"

    IRO_MRF49XA_IE = 0;
    MRF49XA_Config_TX_Mode();
    CS_MRF49XA_Low;
    Delay10TCYx(1);
    SPIWrite(0xBB);
    SPIWrite(0xAA);

    for( i = 0 ; i < T_Frame + 2 ; i++)
    {
        while(SDO_MRF49XA == 0);
        SPIWrite(Frame_TX_MRF49XA[i]);
    }

    Delay_ms(2);
    CS_MRF49XA_High;
    Delay10TCYx(1);
    MRF49XA_Config_RX_Mode();
    IRO_MRF49XA_IE = 1;
}

```

Figura 8.12 – Função para transmitir uma mensagem pelo *transceiver* rádio.**Modos de funcionamento**

```

void MRF49XA_Config_TX_Mode(void)
{
    Config_Reg_MRF49XA(PMCREG |
                       PMCREG_DISCLKOUT);           //Configuração da gestão de energia
                                                    //Clock out desligado, RX desligado

    Config_Reg_MRF49XA(GENCREG | 0x9F);              //Registo de configuração geral
                                                    //Habilita a TXDEN
                                                    //Selecciona a banda dos 433 MHz
                                                    //Configura os condensadores de acoplamento do Xtal como 16pF

    Config_Reg_MRF49XA(PMCREG |
                       PMCREG_DISCLKOUT |
                       PMCREG_TXCEN);                //Configuração da gestão de energia
                                                    //Clock out desligado
                                                    //Habilita o transmissor
}

void MRF49XA_Config_RX_Mode(void)
{
    Config_Reg_MRF49XA(PMCREG |
                       PMCREG_DISCLKOUT |
                       PMCREG_RXCEN);                //Configuração da gestão de energia
                                                    //Clock out desligado
                                                    //Habilita o receptor, desabilita transmissor

    Config_Reg_MRF49XA(GENCREG | 0x5F);              //Registo de configuração geral
                                                    //Habilita a FIFOEN
                                                    //Selecciona a banda dos 433 MHz
                                                    //Configura os condensadores de acoplamento do Xtal como 16pF

    Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x03);           //Configura FIFO como:
                                                    //Começa a preencher a FIFO quando recebe os caracteres de sincronismo
}

void MRF49XA_SLEEP_MODE (void)
{
    FSEL_MRF49XA_High;
    CS_MRF49XA_Low;
    Config_Reg_MRF49XA(STSREG);                      //Limpa as flags do registo de estado
    CS_MRF49XA_High;

    Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x01);            //Desliga o modo de reset.

    Config_Reg_MRF49XA(GENCREG | 0x5F);              //Registo de configuração geral
                                                    //Habilita a FIFOEN
                                                    //Selecciona a banda dos 433 MHz
                                                    //Configura os condensadores de acoplamento do Xtal como 16pF

    Config_Reg_MRF49XA(PMCREG | PMCREG_DISCLKOUT);
}

```

Figura 8.13 – Funções modo de transmissão, recepção e adormecido.

8.3 Firmware – Dispositivo móvel.

Configurações de hardware

```
#pragma config WDTON = SWON           //WDT controlado por firmware
#pragma config WDTPS = 4096           //Período do WDT igual a 16,38 segundos
```

Figura 8.14 – Configurações do “Watchdog”.

Dispositivo móvel - Recepção e filtragem de mensagens

```
if(IRO_MRF49XA_IF && IRO_MRF49XA_IE)
{
    CS_MRF49XA_Low;           //Habilita o MRF49XA

    if(SDO_MRF49XA == 1)
    {
        unsigned int Time_Out;

        CS_MRF49XA_High;
        FSEL_MRF49XA_Low;

        if(Recebeu_Frame_MRF49XA == 1)
        {
            FSEL_MRF49XA_High;

        IGNORE_HERE:
            Config_Reg_MRF49XA(PMCREG |
                               PMCREG_DISCLKOUT); //Configuração da gestão de energia
                                                    //Clock out desligado e desliga o transmissor e receptor

            Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x01); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                    //Gera uma interrupção a cada 8 bits recebidos
                                                    //Desabilita o modo de reset quando VCC é menor que 0,2 V.

            Config_Reg_MRF49XA(GENCREG | 0x1F); //Registo de configuração geral
                                                    //Selecciona a banda dos 433 MHz
                                                    //Configura os condensadores de acoplamento do Xtal como 16pF

            Config_Reg_MRF49XA(GENCREG | 0x5F); //Registo de configuração geral
                                                    //Habilita a FIFO

            Config_Reg_MRF49XA(PMCREG |
                               PMCREG_DISCLKOUT); //Configuração da gestão de energia
                                                    //Clock out desligado
                                                    //Habilita o receptor, desabilita transmissor
                               PMCREG_RXCEN);

            Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x03); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                    //Começa a preencher a FIFO quando recebe os caracteres de sincronismo

            goto RETURN_HERE;
        }

        FSEL_MRF49XA_High;
        Time_Out = 0;

        while(1)
        {
            if(Time_Out++ == 0xFFFF) //Time out para mensagens incompletas
            {
                goto IGNORE_HERE;
            }

            if(FINT_MRF49XA == 1) //Sinalizou a recepção de uma mensagem valida
            {
                FSEL_MRF49XA_Low;
                Time_Out = 0;

                Frame_RX_MRF49XA[Index_Frame_RX_MRF49XA++] = SPIRead();

                if(Index_Frame_RX_MRF49XA == 9) //Se a mensagem estiver mal formatada ignora
                {
                    Index_Frame_RX_MRF49XA = 0;
                    goto IGNORE_HERE;
                }

                if(Frame_RX_MRF49XA[0] != M) //Se o destino da mensagem não for um móvel ignora
                {
                    Index_Frame_RX_MRF49XA = 0;
                    goto IGNORE_HERE;
                }

                if(Index_Frame_RX_MRF49XA >= 8) //Recebeu uma mensagem bem formatada
                {
                    Index_Frame_RX_MRF49XA = 0; //Reinicia buffer local

                    FSEL_MRF49XA_High;

                    Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x01); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                            //Gera uma interrupção a cada 8 bits recebidos
                                                            //Desabilita o modo de reset quando VCC é menor que 0,2 V.

                    Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x03); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                            //Começa a preencher a FIFO quando recebe os caracteres de sincronismo

                    if(Frame_RX_MRF49XA[0] == M &&
                       Frame_RX_MRF49XA[1] == ID_Dispositivo_H &&
                       Frame_RX_MRF49XA[2] == ID_Dispositivo_L) //Verifica se o destino da mensagem é o proprio dispositivo
                    {
                        Recebeu_Frame_MRF49XA = 1; //Sinaliza a recepção de uma mensagem valida
                        goto RETURN_HERE;
                    }
                    else
                    {
                        goto IGNORE_HERE; //Se o destino da mensagem não for o proprio dispositivo ignora
                    }
                }
                FSEL_MRF49XA_High;
            }
        }
    }
    else
    {
        Config_Reg_MRF49XA(STSREG); //Limpa as flags do registo de estado
        CS_MRF49XA_High;
    }

    RETURN_HERE:
    IRO_MRF49XA_IF = 0; //Limpa a flag da interrupção
}
```

Figura 8.15 – Bloco do programa para recepção e filtragem de mensagens, dispositivo móvel.

Dispositivo móvel

```

void main (void)
{
    Config_Hardware();

    while(1)
    {
        Contador++;

        Recebeu_Frame_MRF49XA = 0;
        MRF49XA_Carrega_Buffer_TX_Wake_Up(Contador);           //Envia mensagem de inicio de processo

        TimeOut_RX = 0;

        while(1)                                               //Espera mensagens das bases
        {
            if( Recebeu_Frame_MRF49XA == 1)                   //Se recebeu uma mensagem
            {
                Recebeu_Frame_MRF49XA = 0;

                //Envia mensagem para localização
                Delay_ms(2);
                MRF49XA_Carrega_Buffer_TX(Frame_RX_MRF49XA[4],
                                           Frame_RX_MRF49XA[5],
                                           Frame_RX_MRF49XA[6],
                                           Frame_RX_MRF49XA[7]);
            }

            if(TimeOut_RX > 200)                               //Time out de 200ms
            {
                NOP
                break;
            }
        }

        MRF49XA_SLEEP_MODE();                                //Transceiver entra em modo adormecido
        PIC18F26K22_SLEEP_MODE();                            //Coloca o micro em modo adormecido 16 segundos
    }
}

```

Figura 8.16 – Programa principal implementado para o dispositivo móvel.

8.4 Firmware – Estação base repetidor.

Estação base repetidor

```

void main (void)
{
    Config_Hardware();

    while(1)
    {
        if( Recebeu_Frame_Wake_Up == 1)                     //Se recebeu uma mensagem de wake up do movel
        {
            Recebeu_Frame_Wake_Up = 0;

            ID_Estacao_Base = ID_Dispositivo & 0x00FF;
            Tempo_Sincronismo = ID_Estacao_Base * 45;
            Tempo_Sincronismo = Tempo_Sincronismo - 45;
            Delay_ms(Tempo_Sincronismo);

            MRF49XA_Carrega_Buffer_TX_Movel();
            Activa_TMR1();
        }

        if( Recebeu_Frame_Movel == 1)                       //Recebeu mensagem do movel
        {
            Recebeu_Frame_Movel = 0;
            Tempo_da_Mensagem = ReadTimer1();
            Delay_ms(2);
            MRF49XA_Carrega_Buffer_TX_Base();               //Envia mensagem para base central
        }
    }
}

```

Figura 8.17 – Programa principal implementado para a estação base repetidor.

Estação base repetidor - Recepção e filtragem de mensagens

```

while(1)
{
    if( Time_Out++ == 0xFFFF )
    {
        goto IGNORE_HERE;
    }

    if( FINT_MRF49XA == 1)
    {
        FSEL_MRF49XA_Low;
        Delay10TCYx(1);
        Time_Out = 0;

        Frame_RX_MRF49XA[Index_Frame_RX_MRF49XA++] = SPIRead();

        if( Index_Frame_RX_MRF49XA == 15) //Para não deixar ultrapassar o indice do buffer
        {
            Index_Frame_RX_MRF49XA = 0;
            Soma_RSSI = 0;
            goto IGNORE_HERE;
        }

        if( Frame_RX_MRF49XA[0] != 'B' ) //Reinicia buffer Rx se a frame não começa por 'B'
        {
            Index_Frame_RX_MRF49XA = 0;
            Soma_RSSI = 0;
            goto IGNORE_HERE;
        }

        if( Frame_RX_MRF49XA[0] == 'B' )
            Soma_RSSI = Soma_RSSI + Le_RSSI();

        if( Index_Frame_RX_MRF49XA >= 8 &&
            Frame_RX_MRF49XA[0] == 'B' &&
            Frame_RX_MRF49XA[1] == 0xFF &&
            Frame_RX_MRF49XA[2] == 0xFF ) //Se recebe uma frame do movel em broadcast
        {
            Index_Frame_RX_MRF49XA = 0;
            Soma_RSSI = 0;

            FSEL_MRF49XA_High;
            Delay10TCYx(1);

            Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x01); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                    //Gera uma interrupção a cada 8 bits recebidos
                                                    //Desabilita o modo de reset quando VCC é menor que 0,2 V.

            Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x03); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                    //Começa a preencher a FIFO quando recebe os caracteres de sincronismo

            Recebeu_Frame_Wake_Up = 1;

            goto RETURN_HERE;
        }

        if( Index_Frame_RX_MRF49XA >= 8 &&
            Frame_RX_MRF49XA[0] == 'B' &&
            Frame_RX_MRF49XA[1] == ID_Dispositivo_H &&
            Frame_RX_MRF49XA[2] == ID_Dispositivo_L ) //Se recebe uma frame do movel
        {
            Index_Frame_RX_MRF49XA = 0;
            RSSI_Medido = Soma_RSSI / 8;
            Soma_RSSI = 0;

            FSEL_MRF49XA_High;
            Delay10TCYx(1);

            Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x01); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                    //Gera uma interrupção a cada 8 bits recebidos
                                                    //Desabilita o modo de reset quando VCC é menor que 0,2 V.

            Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x03); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                    //Começa a preencher a FIFO quando recebe os caracteres de sincronismo

            Recebeu_Frame_Movel = 1;

            goto RETURN_HERE;
        }

        FSEL_MRF49XA_High;
        Delay10TCYx(1);
    }
}

```

Figura 8.18 – Bloco do programa para recepção e filtragem de mensagens, estação base repetidor.

8.5 Firmware – Estação base.

```
Estação base

void main (void)
{
    Config_Hardware();

    while(1)
    {
        if( Recebeu_Frame_Wake_Up == 1)                //Se recebeu uma mensagem de wake up do movel
        {
            Recebeu_Frame_Wake_Up = 0;
            MRF49XA_Carrega_Buffer_TX_Movel();
            TimeOut_RX = 0;
            Activa_TMR1();
        }

        if( Recebeu_Frame_Movel == 1)                  //Recebeu mensagem do movel
        {
            Recebeu_Frame_Movel = 0;
            Tempo_da_Mensagem = ReadTimer1();
            Processa_Mensagem_Recebida_MRF49XA();
        }

        if( Recebeu_Frame_Base == 1)                  //Recebeu mensagem de outra base
        {
            Recebeu_Frame_Base = 0;
            Processa_Mensagem_Recebida_MRF49XA();
        }
    }
}
```

Figura 8.19 – Programa principal implementado para a estação base.

Estação base - Recepção e filtragem de mensagens

```

while(1)
{
    if( Time_Out++ == 0xFFFF )
    {
        goto IGNORE_HERE;
    }

    if( FINT_MRF49XA == 1)
    {
        FSEL_MRF49XA_Low;
        Delay10TCYx(1);
        Time_Out = 0;

        Frame_RX_MRF49XA[Index_Frame_RX_MRF49XA++] = SPIRead();

        if( Index_Frame_RX_MRF49XA == 16)
        {
            Indice_Frame_RX_MRF49XA = 0;
            Soma_RSSI = 0;
            goto IGNORE_HERE;
        }

        if( Frame_RX_MRF49XA[0] != 'B') //Reinicia buffer se a frame não começa por 'B'
        {
            Indice_Frame_RX_MRF49XA = 0;
            Soma_RSSI = 0;
            goto IGNORE_HERE;
        }

        if( Frame_RX_MRF49XA[0] == 'B')
        {
            Soma_RSSI = Soma_RSSI + Le_RSSI();
        }

        if( Indice_Frame_RX_MRF49XA >= 15 && //Se recebe uma frame de outra base
            Frame_RX_MRF49XA[0] == 'B' &&
            Frame_RX_MRF49XA[1] == ID_Dispositivo_H &&
            Frame_RX_MRF49XA[2] == ID_Dispositivo_L &&
            Frame_RX_MRF49XA[3] == 'B')
        {
            Indice_Frame_RX_MRF49XA = 0;
            Soma_RSSI = 0;

            FSEL_MRF49XA_High;
            Delay10TCYx(1);
            Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x01); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                    //Gera uma interrupção a cada 8 bits recebidos
                                                    //Desabilita o modo de reset quando VCC é menor que 0,2 V.

            Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x03); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                    //Começa a preencher a FIFO quando recebe os caracteres de sincronismo

            Recebeu_Frame_Base = 1;
            goto RETURN_HERE;
        }

        if( Indice_Frame_RX_MRF49XA >= 8 && //Se recebe uma frame do movel em broadcast
            Frame_RX_MRF49XA[0] == 'B' &&
            Frame_RX_MRF49XA[1] == 0xFF &&
            Frame_RX_MRF49XA[2] == 0xFF &&
            Frame_RX_MRF49XA[3] == 'M')
        {
            Indice_Frame_RX_MRF49XA = 0;
            Soma_RSSI = 0;

            FSEL_MRF49XA_High;
            Delay10TCYx(1);
            Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x01); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                    //Gera uma interrupção a cada 8 bits recebidos
                                                    //Desabilita o modo de reset quando VCC é menor que 0,2 V.

            Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x03); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                    //Começa a preencher a FIFO quando recebe os caracteres de sincronismo

            Recebeu_Frame_Wake_Up = 1;
            goto RETURN_HERE;
        }

        if( Indice_Frame_RX_MRF49XA >= 8 && //Se recebe uma frame do movel
            Frame_RX_MRF49XA[0] == 'B' &&
            Frame_RX_MRF49XA[1] == ID_Dispositivo_H &&
            Frame_RX_MRF49XA[2] == ID_Dispositivo_L &&
            Frame_RX_MRF49XA[3] == 'M')
        {
            Indice_Frame_RX_MRF49XA = 0;
            RSSI_Medido = Soma_RSSI / 8;
            Soma_RSSI = 0;

            FSEL_MRF49XA_High;
            Delay10TCYx(1);
            Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x01); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                    //Gera uma interrupção a cada 8 bits recebidos
                                                    //Desabilita o modo de reset quando VCC é menor que 0,2 V.

            Config_Reg_MRF49XA(FIFORSTREG | 0x03); //Configura e reinicia a FIFO como:
                                                    //Começa a preencher a FIFO quando recebe os caracteres de sincronismo

            Recebeu_Frame_Movel = 1;
            goto RETURN_HERE;
        }

        FSEL_MRF49XA_High;
        Delay10TCYx(1);
    }
}

```

Figura 8.20 – Bloco do programa para recepção e filtragem de mensagens, estação base.

9 ANEXO II

9.1 Software de monitorização do sistema

Filtragem e processamento - 1

```

Dim Aux As String
If Status_Receive_Frame = 1 Then
    Status_Receive_Frame = 0

    If (Frame_RX(0) = 65 And Frame_RX(1) = 84) Then
        ID_Destino = 256 * Frame_RX(2) + Frame_RX(3)
        ID_Origem = 256 * Frame_RX(4) + Frame_RX(5)
        RSSI = 256 * Frame_RX(6) + Frame_RX(7)
        N_Msg = 256 * Frame_RX(8) + Frame_RX(9)
        Tempo_Msg = 256 * Frame_RX(10) + Frame_RX(11)

        STR_ID_Destino = Str(ID_Destino)
        STR_ID_Origem = Str(ID_Origem)
        STR_RSSI = Str(RSSI)
        STR_N_Msg = Str(N_Msg)
        STR_Tempo_Msg = Str(Tempo_Msg)

        Lst_Receive_Msg.AddItem "          " & STR_ID_Destino & "          |
                                " & STR_ID_Origem & "          |
                                " & STR_RSSI & "          |
                                " & STR_N_Msg & "          |
                                " & STR_Tempo_Msg, 0

        If (Lst_Receive_Msg.ListCount > 10) Then
            Lst_Receive_Msg.RemoveItem (Lst_Receive_Msg.ListCount - 1)
        End If

        On Error Resume Next

        Data_Actual = DateValue(Now)
        Hora_Actual = TimeValue(Now)

        RLocation_DB.Recordset.AddNew

        RLocation_DB.Recordset.Fields("Carimbo_Temporal_Data") = CStr(Data_Actual)
        RLocation_DB.Recordset.Fields("Carimbo_Temporal_Hora") = CStr(Hora_Actual)
        RLocation_DB.Recordset.Fields("ID_Destino") = STR_ID_Destino
        RLocation_DB.Recordset.Fields("ID_Origem") = STR_ID_Origem
        RLocation_DB.Recordset.Fields("RSSI_ADC") = STR_RSSI
        RLocation_DB.Recordset.Fields("Numero_Mensagem") = STR_N_Msg
        RLocation_DB.Recordset.Fields("Tempo_Mensagem") = STR_Tempo_Msg

        RLocation_DB.Recordset.Update

        If STR_ID_Destino = 1 Then
            D1 = Parametros_RF.Var_Base1_A * (Sqr(Parametros_RF.Var_Base1_B - RSSI) - Parametros_RF.Var_Base1_C)
        End If

        If STR_ID_Destino = 2 Then
            D2 = Parametros_RF.Var_Base2_A * (Sqr(Parametros_RF.Var_Base2_B - RSSI) - Parametros_RF.Var_Base2_C)
        End If

        If STR_ID_Destino = 3 Then
            D3 = Parametros_RF.Var_Base3_A * (Sqr(Parametros_RF.Var_Base3_B - RSSI) - Parametros_RF.Var_Base3_C)
        End If

        If STR_ID_Destino = 4 Then
            D4 = Parametros_RF.Var_Base4_A * (Sqr(Parametros_RF.Var_Base4_B - RSSI) - Parametros_RF.Var_Base4_C)
        End If

        'o sistema apenas tem definido uma base
        If Parametros_RF.Var_Base1_Activa = True And Parametros_RF.Var_Base2_Activa = False
            And Parametros_RF.Var_Base3_Activa = False And Parametros_RF.Var_Base4_Activa = False Then
            If D1 <> 0 Then
                Picture1.Circle (Parametros_RF.Var_Base1_Loc_X, Parametros_RF.Var_Base1_Loc_Y), D1, vbBlack
                D1 = 0
            End If
        End If

        'o sistema apenas tem definido duas bases
        If Parametros_RF.Var_Base1_Activa = True And Parametros_RF.Var_Base2_Activa = True
            And Parametros_RF.Var_Base3_Activa = False And Parametros_RF.Var_Base4_Activa = False Then
            If D1 <> 0 And D2 <> 0 Then
                Aux = Determina_Posicao_2_Bases(D1, D2)
                D1 = 0
                D2 = 0
            End If
        End If
    End If
End If

```

Figura 9.1 – Filtragem e processamento, parte 1.

Filtragem e processamento - 2

```

End If
End If
'0 sistema apenas tem definido tres bases
If Parametros_RF.Var_Base1_Activa = True And Parametros_RF.Var_Base2_Activa = True
And Parametros_RF.Var_Base3_Activa = True And Parametros_RF.Var_Base4_Activa = False Then

    If D1 <> 0 And D2 <> 0 And D3 <> 0 Then

        Aux = Determina_Posicao_3_Bases(D1, D2, D3)
        D1 = 0
        D2 = 0
        D3 = 0

    End If

End If

'0 sistema apenas tem definido quatro bases
If Parametros_RF.Var_Base1_Activa = True And Parametros_RF.Var_Base2_Activa = True
And Parametros_RF.Var_Base3_Activa = True And Parametros_RF.Var_Base4_Activa = True Then

    If D1 <> 0 And D2 <> 0 And D3 <> 0 And D4 <> 0 Then

        D1 = 0
        D2 = 0
        D3 = 0
        D4 = 0

    End If

End If
End If
End If

```

Figura 9.2 – Filtragem e processamento, parte 2.

Algoritmo de localização

```

A0 = 2 * (Parametros_RF.Var_Base2_Loc_X - Parametros_RF.Var_Base1_Loc_X)
A1 = 2 * (Parametros_RF.Var_Base2_Loc_Y - Parametros_RF.Var_Base1_Loc_Y)
A2 = 2 * (Parametros_RF.Var_Base3_Loc_X - Parametros_RF.Var_Base1_Loc_X)
A3 = 2 * (Parametros_RF.Var_Base3_Loc_Y - Parametros_RF.Var_Base1_Loc_Y)

B0 = Dist_1 ^ 2 - Dist_2 ^ 2 + Parametros_RF.Var_Base2_Loc_X ^ 2 - Parametros_RF.Var_Base1_Loc_X ^ 2
+ Parametros_RF.Var_Base2_Loc_Y ^ 2 - Parametros_RF.Var_Base1_Loc_Y ^ 2
B1 = Dist_1 ^ 2 - Dist_3 ^ 2 + Parametros_RF.Var_Base3_Loc_X ^ 2 - Parametros_RF.Var_Base1_Loc_X ^ 2
+ Parametros_RF.Var_Base3_Loc_Y ^ 2 - Parametros_RF.Var_Base1_Loc_Y ^ 2

'Transposta
A0_T = A0
A1_T = A1
A2_T = A2
A3_T = A3

'Multiplicação A_T * A
A0_M = A0_T * A0 + A1_T * A1
A1_M = A0_T * A1 + A1_T * A2
A2_M = A0_T * A2 + A1_T * A3
A3_M = A2_T * A1 + A3_T * A2

'Matriz inversa
A0_I = A3_M / (A0_M * A3_M - A1_M * A2_M)
A1_I = -A1_M / (A0_M * A3_M - A1_M * A2_M)
A2_I = -A2_M / (A0_M * A3_M - A1_M * A2_M)
A3_I = A0_M / (A0_M * A3_M - A1_M * A2_M)

'Multiplicação A_I * A_T
A0_M = A0_I * A0_T + A1_I * A1_T
A1_M = A0_I * A1_T + A1_I * A2_T
A2_M = A0_I * A2_T + A1_I * A3_T
A3_M = A2_I * A1_T + A3_I * A3_T

'Multiplica por por B
X = A0_M * B0 + A1_M * B1
Y = A2_M * B0 + A3_M * B1

Cor_Trajeto = Cor_Trajeto + 1
If Cor_Trajeto > 21 Then
    Cor_Trajeto = 1
End If

Aux = Mostra_Posicao(((Val(X) * 500) / txt_Dim_Largura), ((Val(Y) * 400) / txt_Dim_Comprimento), Val(Cor_Trajeto))

```

Figura 9.3 – Algoritmo de localização.

10 ANEXO III

10.1 Algoritmo de localização por lateração circular em MATLAB

Algoritmo de localização

```
%Localização das estações base
Base_1 = [0 0];
Base_2 = [200 0];
Base_3 = [100 100];

%Matriz A
A = [2*(Base_1(1) - Base_3(1)),
      2*(Base_1(2) - Base_3(2));
      2*(Base_2(1) - Base_3(1)),
      2*(Base_2(2) - Base_3(2))];

%Ponto 1
D1_B1 = xlsread('Analise_Sem_Filtro.xlsx', 4, 'B8:B34');
D1_B2 = xlsread('Analise_Sem_Filtro.xlsx', 4, 'D8:D34');
D1_B3 = xlsread('Analise_Sem_Filtro.xlsx', 4, 'F8:F34');

%Algoritmo posição 1
for n = 1:27

    B1 = [Base_1(1)^2 - Base_3(1)^2 + Base_1(2)^2 - Base_3(2)^2 + D1_B3(n)^2 - D1_B1(n)^2];
    B2 = [Base_2(1)^2 - Base_3(1)^2 + Base_2(2)^2 - Base_3(2)^2 + D1_B3(n)^2 - D1_B2(n)^2];

    %Matriz W
    W = [(1/(D1_B2(n))^2), 0; 0, (1/(D1_B3(n))^2)];

    %Matriz B
    B = [B1 ; B2];

    %Posição
    X = inv(A'*A)*A'*B;
    X_W = inv(A'*W*A)*A'*W*B;

    Pos_X_1(n) = X(1);
    Pos_Y_1(n) = X(2);

    Pos_X_W_1(n) = X_W(1);
    Pos_Y_W_1(n) = X_W(2);

end

figure(1);
hold on;
plot(Pos_X_1, Pos_Y_1, 'x');
plot(55, 45, 'o');
axis([0 200 0 100]);
title('Metodo MLE');
hold off;

figure(2);
hold on;
plot(Pos_X_W_1, Pos_Y_W_1, 'x');
plot(55, 45, 'o');
axis([0 200 0 100]);
title('Metodo WMLE');
hold off;
```

Figura 10.1 – Algoritmo de localização - MATLAB.

